РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Сборник статей
XI Российского семинара
по технологической минералогии

RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
KARELIAN RESEARCH CENTRE
INSTITUTE OF GEOLOGY

RESULTS OF INTERDISCIPLINARY RESEARCHES IN TECHNOLOGICAL MINERALOGY

Collection of articles of the XI Russian Seminar of the Technological Mineralogy

Edited by Dr. sc. Vladimir V. Shchiptsov

Petrozavodsk
2017

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Сборник статей XI Российского семинара по технологической минералогии

Под редакцией д. г.-м. н. В. В. Щипцова

Петрозаводск
2017

УДК 622.7.017:001.8
ББК 33.4
Р34

Р34 **РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ.** Сборник статей XI Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. 164 с.

ISBN 978-5-9274-0788-0

© Российское минералогическое общество, 2017
© Карельский научный центр РАН, 2017
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2017

Посвящается 200-летию Российского минералогического общества и 100-летию института «Механобр»

Dedicated to the 200th anniversary of the Russian Mineralogical Society and 100th anniversary of the Institute of Mechanobr

ПРЕДИСЛОВИЕ

11-й выпуск трудов комиссии по технологической минералогии посвящается двум знаменательным датам: в 2017 г. исполнилось 200 лет Российскому минералогическому обществу, организованному 7(19) января 1817 года в Санкт-Петербурге, и 100-летию института «Механобр».

На обложке сборника фото памятного сувенира «Весенний Петербург», расписанного заслуженным художником России Т. В. Афанасьевой и изготовленного в честь 100-летия НПК «Мехаобр-Техника» на Императорском фарфоровом заводе в Санкт-Петербурге. Знаменательно, что Минералогическое общество и Механобр созданы на Васильевском – «были и остаемся на Васильевском…».

В 1916 г. профессор горного института Г. О. Чечотт, обогатитель по профессии, создал компанию для выполнения заказа российского военного ведомства по производству артиллерийских запалов на основе высокообогащенного вольфрама. К сотрудничеству в ней он пригласил своего коллегу С. Е. Андреева, обогатителя-технолога, и Л. Б. Левенсона, механика, конструктора, расчетчика и знатока обогатительного оборудования. Компания получила сокращенное название «Механобр» (механическая обработка полезных ископаемых). Таким образом, уже тогда в фирме проявился комплексный подход к решению проблемы: исследование – проектирование – оборудование, выдержавший испытание временем и доказавший свою жизнеспособность на практике. В 1920 г. Механобр был преобразован в государственную организацию. Каждый период деятельности «Механобра» связан с проектированием и пуском важных народнохозяйственных объектов, участием в создании новых научных и проектных институтов. Каждый из периодов деятельности института «Механобр» ознаменован пуском важных для народного хозяйства страны объектов.

1927–1932 гг. – проектирование и ввод в действие апатито-нефелиновой обогатительной фабрики (АНОФ-1) треста «Апатит», обогатительных фабрик Балхашского и Лениногорского комбинатов и ряда других крупных промышленных предприятий.

1933–1940 гг. – проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию горно-обогатительных предприятий на Урале, Алтае, Кавказе, в Казахстане, Сибири и на Дальнем Востоке.

1941–1945 гг. – работа по обороне блокадного Ленинграда, создание комплексного научно-исследовательского и проектного института «Уралмеханобр» (г. Свердловск), работа комплексных проектно-технологических бригад на горно-обогатительных предприятиях страны.

1946–1959 гг. – создание комплексного научно-исследовательского и проектного института «Механобрчермет» (г. Кривой Рог), проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию обогатительных фабрик Южного, Ново-Криворожского и Азербайджанского ГОКов, Норильской, Агаракской и Каджаранской обогатительных фабрик, десятков горно-обогатительных предприятий в России, Украине, Казахстане, Узбекистане, а также за рубежом.

В 1958 году создан комплексный научно-исследовательский и проектный институт «Казмеханобр» (г. Алма-Ата).

1960–1969 гг. – запроектированы и построены горно-обогатительные комбинаты «Печенганикель», Оленегорский, АНОФ-2 горно-химического комбината «Апатит» на Кольском полуострове, Маднеульский ГОК в Грузии, Полтавский, Северный, Центральный ГОКи в Украине, Михайловский, Лебединский, Стойленский ГОКи в районе Курской магнитной аномалии, Джезказганский, Зыряновский комбинаты в Казахстане, Алмалыкский ком-

бинат в Узбекистане и десятки других горно-обогатительных предприятий в СССР и за рубежом.

Мировым признанием заслуг «Механобра» в области переработки минерального сырья стало проведение в 1968 г. в Ленинграде VIII Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых.

1970–1990 гг. – запроектированы и построены ГОКи нового поколения: в Карелии – Костомукшский, в Монголии – «Эрдэнэт».

На обогатительных и агломерационных фабриках бывшего Советского Союза, запроектированных институтом, перерабатывалось свыше 70 % руд цветных металлов, около 65 % руд черных металлов и производилось 70 % агломератов для доменных печей.

В период экономических реформ «Механобр» был акционирован и на его базе создана группа «Механобр». Вся инженерная и научно-техническая деятельность группы сосредоточена в двух компаниях – «Научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (АО) и ЗАО «Механобр инжиниринг». В состав НПК «Механобр-техника» вошли СКБ «Механобр», экспериментально-конструкторская часть, опытный завод «Механобр-Л», научная часть (создание обогатительного оборудования), а также группа научных отделов и лабораторий, занимающихся процессами дезинтеграции, классификации, грохочения, магнитной и электрической сепарации.

Здесь необходимо подчеркнуть, что технологическая минералогия и деятельность комиссии тесно связаны с историей Института «Механобр». Ярким примером интуитивного использования технологической минералогии на заре создания института является выполнение заказа российского военного ведомства по производству артиллерийских запалов на основе высокообогащенного вольфрама.

Вторым важным обстоятельством является то, что 15 декабря 1983 г. на заседании Ученого совета утвердили создание при ВМО Комиссии по технологической минералогии под председательством В. И. Ревнивцева, директора «Механобр».

С 26 по 30 сентября 2016 г. в Санкт-Петербурге проходило крупное мероприятие, посвященное 100-летию со дня создания института «Механобр». Л. А. Вайсберг, основатель и бессменный научный руководитель инновационного предприятия – Научно-производственной корпорации «Механобр-техника», пригласил и создал все благоприятные условия для проведения XI Российского семинара по технологической минералогии в рамках общих мероприятий, посвященных 100-летию Института «Механобр». Председателю комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцову в память об этом знаковом и важном событии в знак уважения был вручен памятный сувенир, расписанный, как выше упомянуто, заслуженным художником России Т. В. Афанасьевой и изготовленный в Санкт-Петербурге ограниченным тиражом.

В торжественном заседании участвовали заместитель полномочного представителя Президента РФ в Северо-Западном федеральном округе Л. Совершаева, Председатель Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга А. Максимов, заместитель директора Департамента науки и технологий Министерства образования и науки А. А. Антропов, академик-секретарь ОНЗ РАН А. О. Глико, директор геофизического центра РАН А. Д. Гвишиани, вице-президент Китайского института горного дела и металлургии Ся Сяооу и многие другие.

Конференцию открыл ректор Горного университета В. С. Литвиненко. Обращаясь к аудитории, руководитель старейшего технического вуза России подчеркнул, что потенциал отечественной минерально-сырьевой отрасли очень велик, но для того чтобы целенаправленно работать на экономику России, он должен быть в полной мере раскрыт.

В МФК «Горный» и НПК «Механобр» состоялась международная конференция «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016). Она была приурочена к 100-летию института «Механобр». Председателем Оргкомитета был академик РАН В. А. Чантурия.

«Плаксинские чтения» проводятся каждую осень, начиная с 1977 года, в память о члене-корреспонденте РАН Игоре Николаевиче Плаксине. Этот человек стоял у истоков советской научной школы обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии редких, цветных и благородных металлов, был дважды удостоен звания лауреата Государственной премии СССР. Ежегодные собрания, в которых принимают участие ведущие ученые, представители властных структур и профильных предприятий, посвящены наиболее актуальным вопросам в сфере глу-

бокой переработки сырья и проводятся в различных городах нашей страны.

В программу юбилейных мероприятий также входила работа XI Российского семинара по технологической минералогии на тему «Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии». Организаторами семинара выступали Комиссия по технологической минералогии РМО, НПК «Механобр-Техника», Институт геологии КарНЦ РАН.

Участвовали в работе около 60 специалистов, представляющих научные организации, университеты и компании России, Узбекистана и Китая. Руководителями (модераторами) семинара были чл.-корр. РАН,. профессор Л. А. Вайсберг и д.г.-м.н. В. В. Щипцов. В семинаре участвовали академик РАН А. М. Асхабов, академик РАН В. А. Чантурия, президент РМО чл.-корр. РАН Ю. Б. Марин, профессор Ю. Л. Войтеховский, д.г.-м.н. А. П. Козлов, профессор С. А. Кондратьев, д.г.-м.н. Р. И. Конеев (Узбекистан), д.г.-м.н. О. Б. Котова, д.г.-м.н. Е. Н. Левченко, д.г.-м.н. Т. З. Лыгина, д.г.-м.н. Е. Г. Ожогина, профессор Б. И. Пирогов, д.г.-м.н. А. Ф. Сметанников, д.г.-м.н. В. В. Строкова, д.г.-м.н. И. Д. Устинов, профессор Е. Л. Чантурия, д.г.-м.н. Т. С. Юсупов, д.г.-м.н. О. А. Якушина и др.

Четыре доклада были представлены на пленарное заседание:

Щипцов В. В. [1] (докладчик), Пирогов Б. И.[2], Ожогина Е. Г. [2], Котова О. Б. [3] (ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск; ФГБУ «ВИМС», г. Москва; Институт геологии КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия); Технологическая минералогия в развитии минерально-сырьевой базы России;

Асхабов А. М. (Институт геологии КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия) Минералогические следствия вторжения в «мир обойденных величин»;

Юсупов Т. С. [1], Кондратьев С. А. [2] (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск; ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия) Задачи обогатительной минералогии в совершенствовании раскрытия сростков и селективного разрушения минералов;

Вайсберг Л. А.[1], Кононов О. В.[2], Устинов И. Д.[1] ([1] НПК «Механобр-техника, г. Санкт-Петербург; [2] МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия) Минералогия молибдошеелитовых руд; эволюция их раскрытия и предварительной концентрации.

Важными темами стали новые подходы в технологической минералогии по определению и направленному изменению физических и химических свойств руд и промышленных минералов; комплекс новых высокоэффективных технологических решений при оценке качества минерального сырья; топоминералогические исследования и геолого-технологическое картирование; прикладные математические методы в технологической минералогии; влияние эколого-экономических факторов на выбор методов и приемов технологической минералогии.

На семинаре победителями среди молодых ученых были выдвинуты к награждению доклады М. В. Рязанцевой (ИПКОН РАН) и А. А. Быстровой (ВИМС). На итоговом заседании под эгидой Научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых им вручены дипломы и памятные сувениры.

Семинар завершил работу дискуссией, на которой на которой обсуждались важные вопросы и предложения. Выступили Б. И. Пирогов, Ю. Л. Войтеховский, А. Н. Чертов, Е. Г. Ожогина, И. В. Жерновский, И. Н. Бурцев, В. В. Щипцов.

В предлагаемый сборник научных статей включена 21 статья по теме, которой был посвящен XI семинар по технологической минералогии.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В РАЗВИТИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РОССИИ И РОЛЬ КОМИССИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ РМО

Щипцов В. В[1]., Пирогов Б. И[2]., Ожогина Е. Г[2]., Котова О. Б[3].

[1]ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск; [2]ФГБУ «ВИМС им. Н. М. Федоровского», г. Москва; [3]ИГ КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар

Истоки истории

Когда мы обращаемся к истокам технологической минералогии, то убеждаемся в том, что первые догадки, мысли закладывались в далеком прошлом. Академик В. М. Севергин в своем учебнике связал задачи минералогии с изучением строения и состава минералов, выяснением их взаимоотношений в месторождениях, установлением возможности их практического использования и ввел понятие «технологическая и экономическая минералогия», что и определило дальнейшую традиционную практическую направленность российской минералогии [1]. В. М. Севергин не был одинок в своей деятельности по разработке и распространению прогрессивных приемов технологии производства и использования отечественного минерального и сельскохозяйственного сырья. Такую работу проводили его современники и коллеги по Академии наук – академики Т. Е. Ловиц, Я. Д. Захаров, И. Ф. Гмелин, К. С. Кирхгофф и другие ученые России [2].

Рис. 1. История научного направления (из презентации Б. И. Пирогова – Москва, 2012)

Рис. 2. Бюст В. М. Севергина в музее землеведения МГУ

Минералого-технологические исследования великого ученого и его последователей во многом предопределили будущее технологической минералогии, связанное с развитием морфолого-структурного, кристаллохимического и генетического направлений в минералогии при оценке обогатимости различных видов минерального сырья.

1916 г. – создание компании «Механобр»

Ярким примером интуитивного использования технологической минералогии является выполнение заказа российского военного ведомства по производству артиллерийских запалов на основе высокообогащенного вольфрама. Для этого профессор Санкт-Петербургского горного института Г. О. Чечотт, обогатитель по профессии, совместно с обогатителем-технологом С. Е. Андреевым и механиком-конструктором Л. Б. Левенсоном создали в 1916 г. компанию «Механобр» (механическая обработка полезных ископаемых).

Рис. 3. Чечотт Генрих Оттонович (1875–1928 гг.)

Рис. 4. Андреев Сергей Ефимович (1881–1964 гг.)

Рис. 5. Федоровский Николай Михайлович (1886–1956), чл.-корр. АН СССР, д.г.-м.н., профессор, видный организатор отечественной горной промышленности, крупный ученый геолог и минералог

Таким образом, уже тогда в фирме проявился комплексный подход к решению проблемы: исследование – проектирование – оборудование, выдержавший испытание временем и доказавший свою жизнеспособность на практике.

1921–1955 гг. – разработка основ геолого-минералогической оценки руд месторождений полезных ископаемых

Существенный этап разработки основ геолого-минералогической оценки руд месторождений полезных ископаемых определяется периодом 1921–1955 гг. В первые годы после Великой Октябрьской социалистической революции в отечественной минералогии возникло новое научное направление – прикладная минералогия. Создание ее тесно связано с именем блестящего организатора и крупного ученого-геолога Н. М. Федоровского [3].

Прикладная минералогия в понимании Н. М. Федоровского охватывает весь комплекс минералогических исследований, направленных на вовлечение в промышленное использование нового минерального сырья: детальное изучение физических, физико-химических и технологических свойств минералов, разработку для этой цели новых методов исследования, установление минералогических критериев для поисков и оценки месторождений полезных ископаемых. Она включает также создание наиболее рациональных технологических схем обогащения и переработки минерального сырья, для чего необходима совместная работа минералогов, обогатителей и химиков-технологов. В то же время прикладная минералогия необычайно тесно связана и с экономической минералогией, основателем которой также был Н. М. Федоровский, и с генетической. Он создал минералогическую школу Института прикладной минералогии (В. В. Аршинов, Н. Е. Веденеева, А. А. Глаголев, Е. В. Рожкова, Я. Д. Готман, Е. В. Копченова, Ф. В. Сыромятников и др.) [4].

Работы по прикладной минералогии стали быстро развиваться как в самом Институте прикладной минералогии, так и в других организациях, многие из которых впоследствии выросли в крупные институты (Кавказский институт им. А. А. Твалчрелидзе (КИМС), Гинцветмет, Гиредмет, Механобр и др.). Создание прикладной минералогии было очень одобрительно встречено В. И. Вернадским [5]. Он писал, что истекшее десятилетие одновременно выдвинуло в минералогии цикл крупных и интереснейших задач, связанных с проблемами прикладной минералогии как минералогической основы учения о рудных ископаемых.

В этот период и в течение следующего этапа создаются минералогические «ячейки» (лаборатории, отделы вещественного состава по изучению различных видов полезных ископаемых и в целом минерального сырья) в институтах геологического (КИМС, КазИМС, ИМР, ЦНИГРИ, ДВИМС) и технологического профиля (Механобр, ГИГХС, Уралмеханобр,

Рис. 6. Коллектив ИПМ-ВИМС в Большой аудитории института (1930-е годы)

Механобрчермет, ЦНИИОлово, Гинцветмет, Гиредмет и др.). В них проводились первые исследования по прикладной минералогии многих полезных ископаемых, разрабатывались первые технологические схемы, учитывающие взаимосвязь геолого-минералогических факторов с обогатимостью и получением конкретных параметров обогащения.

Принципы технологической минералогии в практике геологоразведочных работ и горнорудного производства

Период 1956–1982 гг. отмечается грандиозным внедрением принципов технологической минералогии в практику геологоразведочных работ и горнорудного производства, которые использовались в прикладной минералогии и оценке различных генетических типов полезных ископаемых. Они же нашли конкретное решение в практике работы крупнейших ГОКов страны (в частности, железных руд – на Южном, Ингулецком, Ново-Криворожском, Центральном и Северном – в Криворожском бассейне; Соколовско-Сарбайском – в Северном Казахстане; Ковдорском и Оленегорском – в Мурманской области; Качканарском – на Среднем Урале; марганцевых руд – в Никопольском и Чиатурском бассейнах и др.).

Вовлечение в сферу практического интереса использования какого-либо минерала или отыскание новых областей применения минералов, уже используемых в народном хозяйстве, зачастую оказывается равноценным по своему технико-экономическому эффекту открытию и освоению новых крупных месторождений. В этом проявляется большая роль технологической минералогии. А. И. Гинзбург подчеркивал, что не существует минералов, не имеющих практического значения, мы просто не умеем еще все их использовать [6].

Важное место принадлежит монографии «Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ» [7], в которой показано значение минералогических исследований для повышения эффективности поисково-разведочных работ и рассмотрены задачи технологической минералогии и состояние генетической минералогии.

Под непосредственным руководством В. И. Кузьмина разработаны новые методы минералогических исследований, усовершенствована общая методика изучения вещественного состава руд применительно к различным видам минерального сырья, в первую очередь, тонкодисперсных (железомарганцевые океанические образования, бокситы, редкометалльные коры выветривания и др.).

Итак, в 80-е годы трудами отечественных ученых-геологов и технологов была сформирована как самостоятельная научная дисциплина «технологическая минералогия» и определены ее основные направления [8].

Рис. 7. Гинзбург Анатолий (Натан) Ильич (1917–1984), профессор, д.г.-м.н., минералог и геохимик, почетный член РМО, заложил основы минералогии новых видов минерального сырья, выявил новые источники минерального сырья для получения редких металлов, дважды лауреат Государственной премии (1946, 1956)

Рис. 8. Кузьмин Владимир Иванович, д.г.-м.н., почетный член РМО

Создание Комиссии по технологической минералогии ВМО

В 1982 г. в Ленинграде под эгидой АН СССР, ВМО, Министерства цветной металлургии, института Механобр и Ленинградского отделения НТО цветной металлургии прошел VI съезд ВМО, на котором неслучайно во вступительном слове президент ВМО акад. А. В. Сидоренко обратил особое внимание на тот факт, что «именно новые знания о минералах, тонких особенностях их конституции, текстурных и структурных особенностях руд могут послужить научной основой для совершенствования существующих и создания новых методов обогащения, гидрометаллургии и других технологических приемов, приведут в перспективе к созданию безотходной технологии» [9].

С целью объединения усилий ученых и производственников по проблемам технологической минералогии съезд принял решение о создании Комиссии по технологической минералогии. Вслед за этим в Ленинграде 13–16 декабря 1983 г. состоялась годичная сессия ВМО, посвященная теме «Роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы СССР». Тема сессии была обусловлена необходимостью решения актуальных вопросов повышения эффективности, полноты, степени комплексности, рационального использования сырья и прироста разведанных запасов на основе глубокого и целенаправленного изучения минерального состава руд. Обсуждаемая проблема включала в себя три направления: 1. теоретические основы технологической минералогии; 2. технологическая минералогия главнейших промышленных типов месторождений и вопросы геолого-технологического картирования руд; 3. направленное изменение технологических свойств минералов, горных пород и руд с целью разработки рациональных схем извлечения полезных компонентов [10].

В соответствии с решением Президиума и Ученого совета ВМО организация и проведение годичной сессии были поручены научно-исследовательскому институту «Механобр» – головному предприятию Минцветмет СССР по вопросам обогащения руд цветных металлов. Оргкомитет, непосредственно возглавлявший всю подготовку, состоял из представителей раз-

личных организаций и ведомств (ВМО, ИЭМ АН СССР, ВИМС, ВСЕГЕИ, Механобр, МГУ, ИМГРЭ, ЛГИ, Криворожский горнорудный институт). В работе сессии приняли участие 255 человек, представлявших 56 научных институтов, высших учебных заведений, предприятий и организаций Министерства геологии СССР, Министерства цветной металлургии СССР, Министерства черной металлургии СССР, Министерства производства удобрений СССР. Открыл сессию приветствием от Президиума АН СССР чл.-корр. АН СССР В. А. Жариков. Затем к собравшимся с вступительным словом обратился первый вице-президент ВМО проф. Д. В. Рундквист. Он подчеркнул, что одним из резервов расширения сырьевой базы СССР являются месторождения новых промышленных типов, нуждающихся в первоочередном минералогическом и технологическом изучении. С главным докладом «Роль технологической минералогии в развитии минерально-сырьевой базы страны и основные задачи ее формирования как нового научного направления» выступил чл.-корр. АН СССР В. И. Ревнивцев, директор ВНИИ «Механобр». Он перечислил целый ряд организационных вопросов, которые должны быть разрешены для достижения максимального практического эффекта научных разработок. В целом на годичной сессии по вопросам технологической минералогии были прочитаны 24 проблемных и обзорных доклада, продемонстрированы 128 стендовых докладов, с которыми участники сессии были предварительно ознакомлены по опубликованным тезисам.

15 декабря 1983 г. на заседании Ученого совета утвердили создание при ВМО Комиссии по технологической минералогии под председательством В. И. Ревнивцева (Механобр). В состав бюро Комиссии вошли: А. И. Гинзбург (ВИМС), Д. П. Григорьев (ЛГИ), В. В. Доливо-Добровольский (ЛГИ), Ю. Б. Марин (ЛГИ), А. Д. Генкин (ИГЕМ), Б. И. Пирогов (Криворожский горно-рудный институт), О. П. Иванов (ЦНИИОлово), А. Ф. Сидоров (Механобр), В. М. Изоитко (Механобр) – ученый секретарь [10].

Основные результаты деятельности Комиссии в период 1984–1989 гг.

На этом отрезке времени развитие технологической минералогии в стране проходило под значительным влиянием таких организаций, как ВИМС и Механобр. Под этим флагом Комиссия проводит ряд важнейших мероприятий, и как следствие выходят в свет целая серия монографий по различным типам руд и направлениям технологической минералогии, а также коллективные публикации в сборниках статей по применению технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья и проблемам направленного изменения технологических и технических свойств минералов [11, 12, 13 и др.].

В 1985 г. Комиссией организованы и проведены курсы повышения квалификации по технологической минералогии, разработан курс лекций «Геолого-минералогические основы технологической оценки руд цветных металлов». Создан базовый центр для решения задач по технологической минералогии. Выпущен библиографический указатель по технологической минералогии [14].

С первого дня до настоящего времени Б. И. Пирогов, почетный член РМО, является членом Бюро Комиссии технологической минералогии. Он внес большой вклад в создание теоретической базы этого направления, в частности, им разработаны принципы геолого-технологической оценки руд с учетом закономерностей изменчивости технологических свойств минералов в единой геолого-технологической системе. Особый интерес представляет монография коллектива авторов «Технологическая минералогия железных руд», в которой рассмотрены проблемы технологической минералогии руд на современном ГОКе [15]. К этому же периоду относится появление учебного пособия по принципам и методам геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых [16]. Под руководством Б. И. Пирогова проведены минералого-технологические исследования железных и марганцевых руд крупнейших месторождений СССР, а также медно-молибденовых руд монгольского месторождения Эрдэнэт. Значительный вклад он внес в изучение железистых кварцитов докембрийских железокремнистых формаций.

На VII съезде ВМО (Ленинград, 20–23 января 1987) в научную программу были включены доклады по четырем основным темам: 1) основные проблемы минералогии, 2) индикаторы оруденения и минералогическое картирование, 3) неоднородность глубинных зон литосферы и ее значение для поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, 4) технологическая минералогия. На заседании, посвященном технологической минералогии, с проблемным докладом выступил председатель Комиссии по технологической минералогии В. И. Ревнивцев. В своем докладе «Задачи минералогии в интенсификации и перестройке

технологии минерального сырья в свете решений XXVII съезда КПСС» он подчеркнул, что применение технологической минералогии и геолого-технологического картирования на всех стадиях освоения месторождений (от его оценки и добычи до переработки руд) должно быть направлено на внедрение селективной добычи и совершенствование рудоподготовки с целью повышения извлечения полезных компонентов [17].

Рис. 9. Пирогов Борис Иванович, профессор, д.г.-м.н., почетный член РМО, внес значительный вклад в создание теоретических основ технологической минералогии, лауреат премий Совмина СССР и Высшей школы УССР

В 1989 году Комиссия по технологической минералогии ВМО понесла тяжелую утрату – на 58 году скоропостижно ушел из жизни генеральный директор ВНИИ «Механобр», председатель Комиссии, чл.-корр. АН СССР Владимир Иванович Ревнивцев.

Под его руководством исследования по различным направлениям технологической минералогии приобрели четкий системный характер, объединив усилия исследователей прикладных НИИ многих министерств, АН СССР, геологов-разведчиков и работников ГОКов. Они обеспечили дальнейшее углубление и развитие технологической минералогии, разработку ее теоретических основ, внедрение конкретных достижений в производство, проведены фундаментальные и прикладные исследования по технологии и технике комплексного использования минерального сырья.

Рис. 10. Ревнивцев Владимир Иванович (1931–1989), чл.-корр. АН СССР, профессор, д.г.-м.н., основатель научной школы по вовлечению в переработку труднообогатимых руд, объединил проблемно ориентированные фундаментальные исследования, конструкторские и технологические разработки, промышленность и технологию производства в одной программе, дважды лауреат Государственной премии СССР

Основатель научной школы по разработке процессов разделения минералов с близкими свойствами на основе дефектов их кристаллической структуры, благодаря чему стало возможным вовлечение в переработку труднообогатимых руд. Участвовал в создании и развитии крупнейших отечественных и зарубежных горно-обогатительных комбинатов, в том числе Норильского, Костомукшского, Ковдорского, Качканарского, «Апатит», «Эрдэнэт» и других.

Основные результаты деятельности Комиссии в период 1990–2003 гг.

Комиссия продолжила свою деятельность под председательством д. г.-м. н. В. М. Изоитко (ВНИИ «Механобр»), сохраняя прежний состав бюро на первом этапе. Впоследствии в работу были вовлечены Н. П. Юшкин, О. Б. Дудкин, Г. А. Сидоренко, Л. К. Яхонтова и другие специалисты.

В этот период отмечается определенная роль Комиссии в создании лаборатории современных методов минералогического анализа веществ в Криворожском горнорудном институте и откры-

тии межотраслевой геолого-технологической лаборатории Алмалыкского ГМК. Проведен семинар по геотехнологическим методам извлечения цветных металлов (г. Улан-Удэ, 1989).

Необходимо отметить большой вклад проф. Г. А. Сидоренко (ВИМС). Ее работы по комплексированию методов минералогических исследований послужили фундаментальной основой для развития нового направления технологической минералогии [18]. Помимо этого, по ее инициативе получило развитие и внедрение метрологическое обеспечение минералогических исследований как средства повышения качества, достоверности и точности результатов минералогических работ по диагностике и оценке типоморфных свойств минералов, фазового анализа и др.

Рис. 11. Сидоренко Галина Александровна (1926–2015), д. г.-м. н., профессор, почетный член РМО

В январе 1990 г. в Ленинграде состоялось расширенное заседание комиссии с научным семинаром на тему: «Безотходная технология и использование техногенных месторождений». Совместно с комиссией по рудной минералогии изданы труды советских ученых к XV съезду ММА в Пекине [19].

На 8 съезде РМО (1992) с пленарным докладом выступила В. М. Изоитко на тему «Проблемы и достижения технологической минералогии», в котором было освещено применение достижений и методов технологической минералогии для решения задач максимальной полноты и комплексности использования добываемого минерального сырья и утилизации отходов.

В 1997 году выходит в свет книга «Технологическая минералогия и оценка руд» [20]. В ней обобщены материалы в области технологической минералогии и оценки руд. Классифицируются процессы обогащения и типоморфные особенности минералов и руд, влияющие на эти процессы (технологические свойства), а также методы их исследования, и характеризуются особенности геолого-технологической оценки руд важнейших промышленных типов месторождений, ее цели, задачи, методы и последовательность операций на разных стадиях разведки и эксплуатации. Разработаны методики выделения природных и технологических типов по необходимому и достаточному количеству признаков, характеризующих руду.

В условиях рыночной экономики главной проблемой становится рациональное использование недр, включающее в себя такие составляющие, как вовлечение в переработку новых типов минерального сырья, повсеместная утилизация отходов. При решении этих задач технологическая минералогия становится одной из самых востребованных областей геологических наук. В 1998 году в силу этих причин, связанных с новыми задачами технологической минералогии, Ученым советом РМО утвержден новый состав Комиссии [21]: председатель – В. М. Изоитко (проф., АО «Механобр-инжиниринг»); бюро: Д. А. Додин (д. г.-м. н., ВНИИОкеангеология), В. В. Доливо-Добровольский (проф., СПбГТИ), Ю. Б. Марин (проф., СПбГТИ), Б. И. Пирогов (проф., МГТА), Г. А. Сидоренко (д.г.-м.н., ВИМС), В. В. Щипцов (к.г.-м.н., ИГ КарНЦ РАН), Т. С. Юсупов (д.г.-м.н., ОИГГМ СО РАН), Л. К. Яхонтова (д.г.-м.н., МГУ); члены комиссии: П. Г. Алоян (к.г.-м.н., Армнипроцветмет), И. А. Богуш (проф., ЮРТТУ), О. Б. Дудкин (д.г.-м.н., ГИ КНЦ РАН), В. Г. Изотов (к.г.-м.н., КГУ), Л. Ф. Наркелюн (проф., ЧГТУ), К. А. Никифоров (д.г.-м.н., ИВН БФ СО РАН), Б. А. Остащенко (д.г.-м.н., ИГ КомиНЦ УрО РАН), С. В. Петров (к.г.-м.н., АО «Механобр-инжиринг»), Ю. С. Полеховский (к.г.-м.н., СПбГУ), Г. С. Поротов (проф., СПбГТИ), В. Ю. Селезнева (к.г.-м.н., ИГ КазАН), З. В. Специус (к.г.-м.н., ИАП), А. Х. Туресебеков (к. г.-м. н., ИГТУзбАН), П. Ю. Ходанович (к.г.-м.н., ИГ Бур. Ф СО РАН), Б. М. Шмакин (проф., ИГХ СО РАН), Т. Г. Шумилова (к.г.-м.н., ИГ КНЦ УрО РАН). Почти все члены Комиссии возглавляют определенные направления или важные государственные программы

и активно работают в них: «Платина России» – Д. А. Додин; «Малое горное предпринимательство» – В. М. Изоитко, В. В. Щипцов; «Особенности парагенезиса благороднометалльных минералов из месторождений различных генетических типов» – Ю. С. Полеховский; «Проблемы биотехнологии» – Л. К. Яхонтова; «Комплексное использование минерального сырья» – Л. Ф. Наркелюн; «Алмазы и кимберлиты» – З. В. Специус; «Управление качеством минералогических работ» – Г. А. Сидоренко и другие.

Подготовлен и выпущен третий библиографический указатель публикаций по всем направлениям технологической минералогии на тот период [22].

Большой вклад в исследлвания минералогии Хибинских апатитовых месторождений, геохимию и процессы формирования месторождений фосфора в щелочных породах и карбонатитах внес О. Б. Дудкин. Он занимался анализом рудоносности Сыннырского калиевого щелочного массива в Северном Прибайкалье, исследовал карбонатиты Хибин, провел сравнительное изучение массивов Сокли (Финляндия), Ковдорского, Вуориярви и Озерной Вараки (Кольский регион).

Рис. 12. Дудкин Олег Борисович (1931–2013), д.г.-м.н., Почетный член РМО

Проделал большую работу по обобщению материалов о щелочных массивах и карбонатитах восточной части Фенноскандинавского щита. Особое внимание уделял анализу условий формирования месторождений рудного и нерудного сырья и методологии технологической минералогии на примере щелочных массивов.

В апреле 2003 г. безвременно ушла из жизни Виктория Михайловна Изоитко, председатель комиссии по технологической минералогии, яркая личность.

Рис. 13. Изоико Виктория Михайловна (1934–2003), профессор, д. г.-м. н., почетный член РМО, большой вклад внесла в формирование научного направления в геологических науках, изучающее минералы как объекты переработки с помощью различных технологий и объединяющее все виды минералогических исследований с изучением технологических свойств минералов и руд, представитель в Международной минералогической ассоциации (IMA)

Она являлась ведущим специалистом в области технологической минералогии рудных месторождений различных генетических типов, внесла существенный вклад в создание теоретических основ минералого-технологической оценки руд цветных металлов, разработала классификацию геолого-минералогических факторов, влияющих на технологические свойства руд, научно обосновала возможность целенаправленного формирования технологических типов с заданными свойствами в процессе рудоподготовки. С 1987 г. проф. Изоитко заведовала филиалом кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии Горного института в МНТК «Механобр», проводя занятия со студентами, обучающимися по системе ЦИПС (целевая интенсивная подготовка специалистов).

Новый этап деятельности Комиссии по технологической минералогии

По рекомендации президента РМО академика Д. В. Рундквиста с утверждением на Ученом совете РМО произошло изменение дислокации штаб-квартиры Комиссии технологической минералогии. Теперь она стала размещаться на базе Института геологии КарНЦ РАН (председатель Комиссии д.г.-м.н. В. В. Щипцов и секретарь к.г.-м.н. Л. А. Данилевская).

Рис. 14. Щипцов Владимир Владимирович, д.г.-м.н., засл. деят. науки РФ, засл. деят. науки Республики Карелия, почетный член РМО

Начиная с 2006 г., ежегодно Комиссия РМО организует и проводит российские семинары по технологической минералогии.

В 28–29 марта 2006 г. *Первый российский семинар* состоялся в г. Петрозаводске на базе Института геологии КарНЦ РАН и был посвящен рассмотрению актуальных вопросов, которые вызваны особенностями организации геологоразведочных работ в России на современном этапе. Важнейшая задача состояла в повышении роли технологической минералогии в априорной оценке технологических свойств по многим видам руд металлов и промышленных минералов отечественной минерально-сырьевой базы.

С пленарными докладами выступали Пирогов Б. И. (Московское отделение, РГГУ) «Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов»; Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. (Московское отделение, ВИМС) «Технологическая минералогия в решении проблем комплексного освоения полезных ископаемых»; Котова О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ РАН) «Индустриальные наноминералы и проблемы технологической минералогии»; Щипцов В. В. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Технологическая минералогия при оценке индустриальных минералов Карелии»; Галиулин Р. В. (Московское отделение, Институт кристаллографии РАН) «Кристаллография таблицы Менделеева»; Войтеховский Ю. Л. (Кольское отделение, ГИ КНЦ РАН) «Статистический анализ минеральных срастаний в породах и рудах».

Рис. 15. Выступает на первом Российском семинаре по технологической минералогии (Петрозаводск, 2007) лауреат премии им. Е. С. Федорова, д.г.-м.н, Р. В. Галиулин

Второй семинар также проходил в г. Петрозаводске и на стационаре института в пос. Толвуя 14–16 июня 2007 г. Семинар был посвящен рассмотрению актуальных проблем, связанных со значением исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья по различным направлениям. С основными докладами выступили Пирогов Б. И. (Московское отделение, ГГРУ) «Технологическая минералогия изучения полезных ископаемых как основа оценки их комплексности»; Наседкин В. В. (ИГЕМ РАН) «Опыт классификации промышленных минералов на основе минералогического принципа»; Котова О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ Коми НЦ РАН, Дубинчук В. Т. (Московское отделение,» ВИМС) «Углеродистое вещество в метеоритах (РЭМ)»; Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. (Московское отделение, ВИМС) «Стереологические методы технологической оценки минерального сырья»;

Щипцов В. В. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Роль технологической минералогии при оценке многоцелевого использования промышленных минералов Республики Карелия».

Участники семинара приняли участие в полевой экскурсии с посещением действующих карьеров по добыче шунгитсодержащих пород (Зажогинский и Максовский, принадлежащих НПК «Шунгит-Карбон»), а также старой шунгитовой штольни в дер. Шуньга.

Рис. 16. На Зажогинском шунгитовом карьере группа участников семинара из ЦНИИгеолнеруд (Казань). Слева направо Трофимова Ф. А., Лыгина Т. З., Губайдуллина А. М., Пермяков Е. Н. (2007 г.)

Третий семинар вновь проходил в г. Петрозаводске под титулом «Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов». Ключевыми докладами на этом семинаре стали выступления ведущих специалистов в области технологической минералогии: Пирогов Б. И. (Московское отделение, ВИМС) «Онтогенический анализ полезных ископаемых – основа выявления и оценки технологических свойств минералов»; Мелентьев Г. Б. (Московское отделение, ОИВТ РАН) «Инновационная технология и новые задачи технологической минералогии»; Войтеховский Ю. Л. (Кольское отделение, ГИ КНЦ РАН) «Технологическая минералогия и стереологические реконструкции параметров минеральных срастаний»; Котова О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Технологическая минералогия минерального сырья Республики Коми»; Ожогина Е. Г. (Московское отделение, ВИМС) «Технологическая минералогия марганцевых руд Сибири»; Савва Н. Е. (Северо-Восточное отделение, СВК НИИ ДВО РАН) и Пальянова Г. А. (ИГМ СО РАН «Сульфиды Au и Ag в рудах эпитермальных месторождений»; Щипцов В. В. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Способы прогнозирования технологических свойств промышленных минералов (на примере минерально-сырьевой базы Республики Карелия)».

Во время полевой экскурсии специалисты посетили карьер по добыче шокшинского кварцита в пос. Кварцитный.

Рис. 17. Осмотр карьера по добыче шокшинского кварцита (2008 г.)

4-ый Российский семинар «Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы» проходил 14–16 сентября 2009 г. на теплоходе «Борис Полевой» по маршруту Казань-Нижний Новгород-Казань. Для участия в семинаре было принято более 40 докладов от 17 научных организаций, вузов и предприятий, представляющих различные регионы России и СНГ: Апатиты, Екатеринбург, Казань, Москва, Новосибирск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Ташкент, Чита. С заказными докладами выступали Пирогов Б. И. (Московское отделение, ВИМС) «Современные проблемы технологической минералогии»; Юсупов Т. С. (Западно-Сибирское отделение, ИГиМ СО РАН) «Изучение структурных преобразований минералов при тонком измельчении с целью регулирования их технологических свойств»; Лыгина Т. З., Корнилов А. В. (Казанское отделение, ЦНИИгеолнеруд) «Технолого-минералогические исследования – основа прогнозной оценки качества неметаллических полезных ископаемых»; Ожогина Е. Г. (Московское отделение, ВИМС) «Основные направления минералогических исследований руд при создании технологий их комплексной пере-

работки»; Войтеховский Ю. Л., Гришин Н. Н., Нерадовский Ю. Н., Касиков А. Г. (Кольское отделение, ГИ КНЦ РАН, ИХТРЭМС КНЦ РАН) «Кианитовые руды Кейв – перспективная сырьевая база России: технолого-минералогический аспект»; Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П., Данилевская Л. А. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Роль геологических, минералогических и технологических исследований Института геологии КарНЦ РАН в оценке потенциала минерально-сырьевой базы Республики Карелия»; Левченко Е. Н., Ваганов И. Н., Фунтиков Б. В. (ИМГРЭ, Бронницкая экспедиция) «Возможности ФГУП «ИМГРЭ» и Бронницкой геолого-геохимической экспедиции в области технологической минералогии и методов обогащения минерального сырья»; Мелентьев Г. Б. (Московское отделение, ОИВТ РАН) «Термохимические способы переработки природного и техногенного сырья и их инновационное значение»; Туресебеков А. Х., Шамаев О. Т., Шарипов Х. Т. и др. (Институт геологии и геофизики АПН РУз, Ташкент, Узбекистан).

Рис. 18. Встреча «хлебом-солью» участников четвертого Российского семинара по технологической минералогии у борта теплохода «Борис Полевой» (слева направо О. Б. Котова, Е. Г. Ожогина, Б. И. Пирогов, А. Н. Хатькова. Чебоксары, 2009)

5-ый Российский семинар «Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов» проходил 4–7 октября 2010 г. в г. Сыктывкаре на базе Института геологии КомиНЦ УрО РАН. На открытии семинара с приветственными словами выступили директор Института геологии КомиНЦ УрО РАН, чл.-корр. РАН Асхабов А. М., председатель Комиссии по технологической минералогии РМО Щипцов В. В., академик РАН Юшкин Н. П. и ведущий специалист-эксперт Управления Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзора) по Республике Коми Новиков А. И.

Рис. 19. Интервью с акад. РАН Н. П. Юшкиным (Пятый Российский семинар по технологической минералогии, Сыктывкар, 2010)

На пленарном заседании заслушаны доклады Асхабова А. М. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Наноисследования и нанотехнологии в области технологической минералогии: ожидания и перспективы»; Щипцова В. В. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Характеристика типоморфных черт основных промышленных минералов Карелии и сопряженных с ними метаморфических и метасоматических формаций»; Пирогова Б. И. (Московское отделение, ВИМС) «Современные проблемы технологической минералогии на горно-обогатительном комбинате»; Ожогиной Е. Г., Рогожина А. А. (Московское отделение, ВИМС) «Технологическая минералогия: инновационные подходы к оценке качества минерального сырья»; Лыгиной Т. З. (Казанское отделение, ЦНИИгеолнеруд) «Современная технологическая минералогия – инструмент инновационной методологии и оценки технологических свойств неметаллических полезных ископаемых»; Котовой О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Технологическая минералогия:) новые подходы и методы к проблеме раскрытия минералов»; Бурцева И. Н. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) Технологические исследования углей и горючих сланцев Тимано-Североуральского региона; Мальцева К. Р., Устиновой С. А., Иевлева А. А. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Сереговское месторождение каменной соли как комплексный источник поставки геоматериалов для строящихся Сосногорского глино-

земного завода и Ярегского горно-химического комбината».

6-ой Российский семинар «Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах», посвященный 50-летию Института геологии КарНЦ РАН, проходил 26–28 апреля 2011 г. в г. Петрозаводске на базе Института геологии КарНЦ РАН и Петрозаводского госуниверситета. Для участия в семинаре было принято более 30 докладов от 14 научных организаций, вузов, предприятий, министерств и ведомств, представляющих различные регионы России: Апатиты, Казань, Магнитогорск, Москва, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Уфа.

В программу этого семинара были включены такие актуальные проблемы технологической минералогии, как особенности минералов и руд, определяющих их технологические свойства; основные методы изучения вещества в технологической минералогии; влияние геолого-минералогических особенностей руд разных генетических типов на показатели их переработки; роль и влияние технологической минералогии на выбор инновационных решений по комплексной переработке минерального сырья. В сессию пленарных докладов были включены презентации Щипцова В. В. (Карельское отделение, ИГ КарНЦ РАН) «Технологическая минералогия: основные итоги 2006–2010 гг. »; Петрова С. В. и Мишуловича П. М. (Санкт-Петербургское отделение, СПбгосуниверситет) «Геометаллургия – новое, хорошо забытое старое»; Ожогиной Е. Г. и Рогожина А. А. (Московское отделение, ВИМС) «Морфоструктурный состав руд черных металлов: проблема раскрытия минералов»; Мелентьева Г. Б., Короткого В. М. и Малининой Е. Н. (Московское отделение, ОИВТ) «Энергохимическая концепция рационального использования традиционного и альтернативного топливно-энергетического сырья с сопутствующим извлечением особо ценных и токсичных компонентов»; Пирогова Б. И. (Московское отделение, ВИМС) «Поведение минералов в единой геолого-технологической системе»; Лыгиной Т. З. (Казанское отделение, ЦНИИгеолнеруд) «Методические аспекты комплексной оценки качества неметаллических полезных ископаемых»; Котовой О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Новые методы изучения тонкого вещества в технологической минералогии»; Войтеховского Ю. Л. (Кольское отделение, ГИ КНЦ РАН) «Новое в минералогии кианитовых руд, Б. Кейвы, Кольский п-ов».

Рис. 20. Участники VI семинара по технологической минералогии РМО в зале заседаний Института геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, 2011

7-ой Российский семинар «Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии» проходил 9–11 апреля 2012 г. в г. Москва на базе ФГУП «ВИМС». Для участия в семинаре было принято более 30 докладов от 15 науч-

ных организаций, вузов, предприятий, министерств и ведомств, представляющих различные регионы России: Апатиты, Екатеринбург, Казань, Красноярск, Магнитогорск, Москва, Новосибирск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Хабаровск. На открытии семинара с приветственным словом выступил Президент РМО, академик РАН Рундквист Д. В., а также директор Института геологии КарНЦ РАН, председатель Комиссии по технологической минералогии РМО Щипцов В. В. и первый зам. директора ФГУП «ВИМС» Рогожин А. А.

Рис. 21. На открытии седьмого Российского семинара по технологической минералогии, на трибуне зам. генерального директора ФГУП «ВИМС» А. А. Рогожин, за столом президент РМО, академик Д. В. Рундквист и председатель Комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцов (Москва, 2012)

На семинаре были заслушаны пленарные доклады от институтов, занимающихся проблемами технологической минералогии, и ведущих специалистов в данной области исследований. Пленарные доклады следующие: Пирогов Б. И. (Московское отделение РМО, ВИМС) «История становления и развития технологической минералогии»; Щипцов В. В. (Карельское отделение РМО, ИГ КарНЦ РАН) «Роль и место технологической минералогии в высоких технологиях XXI века»; Войтеховский Ю. Л. (Кольское отделение РМО, ГИ КНЦ РАН) «О методологии технологической минералогии»; Ожогина Е. Г., Рогожин А. А. (Московское отделение РМО, ВИМС) «Прогнозная оценка качества минерального сырья методами прикладной минералогии»; Котова О. Б. (Сыктывкарское отделение РМО, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Физика поверхности минералов как метод прогнозной оценки их технологических свойств»; Лыгина Т. З. (Казанское отделение РМО, ЦНИИгеолнеруд) «Технологическая минералогия – портал к новым познаниям». Дополнял программу Круглый стол по теме «Технологическая минералогия: вчера, сегодня, завтра. Применение современных физических методов в технологической минералогии».

Рис. 22. Члены бюро Комиссии по технологической минералогии д.г.-м.н. Ожогина Е. Г. и проф., д.г.-м.н., почетный член РМО Ю. Л. Войтеховский (Москва, 2012)

8-ой Российский семинар «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья» проходил 23–24 апреля 2013 г. в г. Санкт-Петербурге на базе НПК «Механобр-Техника». Непосредственно в работе семинара участвовали представители ряда научных и коммерческих организаций страны, представляющих различные регионы России: Апатиты (ИХТРЭМС КНЦ РАН, ГИ КНЦ РАН), Магадан (СВКНИИ ДВО РАН), Магнитогорск (МГТУ), Москва (ФГУП «ВИМС», ФГУП «ИМГРЭ», ИПКОН РАН, ОИВТ РАН, Техноинфо Лтд, Новосибирск (ИГиМ СО РАН), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН, ПетрГУ), Петропавловск-Камчатский (Институт вулканологии), Санкт-Петербург (НПК «Механобр-Техника», ЗАО «Механобр-Инжиниринг», Корпорация BRUKER, ООО «Институт Гипроникель», ООО «Гравелит», НИУ ИТМО), Саратов (Саратовский ГУ, ООО «ЭкоСорбент»), Сыктывкар (ИГ КомиНЦ УрО РАН, ИСЭиЭПС Коми НЦ УрО РАН), Уфа (БГУ, ООО «Клариса»).

Рассматривались актуальные проблемы технологической минералогии, к ним относятся: 1. Основные направления развития современной технологической минералогии; 2. Минералогический прогноз обогатимости;

3. Новые технологии дезинтеграции минерального сырья; 4. Моделирование процессов дробления и реализация физических методов анализа рудного сырья.

На открытии семинара с приветственными словами обратились председатель совета директоров НПК «Механобр-техника» чл.-корр. РАН Л. А. Вайсберг и председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор ИГ КарНЦ РАН д.г.-м.н. В. В. Щипцов. С пленарными докладами выступили Пирогов Б. И. (Московское отделение, ФГУП «ВИМС») «Срастания минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии»; Вайсберг Л. А., Иванов К. С. (НПК «Механобр-Техника») «Вещественный состав и особенности вибрационной классификации минерального сырья»; Ожогина Е. Г. (Московское отделение, ФГУП «ВИМС») «Проблемы и перспективы развития количественных минералогических методов оценки качества полезных ископаемых»; Юсупов Т. С. (Западно-Сибирское отделение, ИГиМ СО РАН) «Технологическая минералогия геоматериалов, измельченных при повышенной электронапряженности»; Мелентьев Г. Б. (Московское отделение, ОИВТ РАН) «Проблема вовлечения в промышленное использование техногенных ресурсов России: приоритетные направления оценки, инновационных техноэкологических решений и создания инвестиционно-привлекательного законодательства»; Котова О. Б. (Сыктывкарское отделение, ИГ КомиНЦ УрО РАН) «Научное обоснование и разработка методов энергетических воздействий на труднообогатимое минеральное сырье».

Рис. 23. Расширенное заседание бюро Комиссии по технологической минералогии РМО, Санкт-Петербург, 2013. Слева генеральный директор НПК «Механобр-техника» Л. А. Вайсберг, далее в видимой зоне Б. И. Пирогов, Т. С. Юсупов, А. П. Козлов, Г. Б. Мелентьев, С. И. Ануфриева, А. В. Богданович

На семинаре состоялась презентация Корпорации BRUKER. В программу семинара был включен «круглый стол» под председательством чл.-корр. РАН Л. А. Вайсберга.

IX Российский семинар по технологической минералогии «Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений», состоялся 22–24 апреля 2014 г. в Магнитогорске на базе Магнтогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.

В мероприятии участвовали представители академических и отраслевых институтов, ВУЗов и производственных организаций из 11 городов России: Апатиты (ИХТРЭМС КНЦ РАН, ИППЭС КНЦ РАН), Белгород (БГТУ им. В. Г. Шухова), Магнитогорск

(МГТУ, Институт горного дела и транспорта МГТУ, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ЗАО «Урал-Омега», ООО «Евросинтез»), Миасс (ИМ УрО РАН), Москва (ФГУП «ВИМС», ИПКОН РАН, ОИВТ РАН, ИГЕМ РАН, РГГУ), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН, ПетрГУ), Санкт-Петербург (НИУ ИТМО), Сибай (ООО «Башкирская медь»), Сыктывкар (ИГ КомиНЦ УрО РАН, Уфа (ООО «Клариса»), Учалы (ОАО «Учалинский ГОК», Уральское представительство СП ЗАО «ИВС», Учалинский филиал ОАО «Башкиргеология»).

Научная программа семинара была ориентирована на проблемы освоения рудных месторождений, развития горно-металлургического производства.

Рис. 24. Участники девятого Российского семинара по технологической минералогии на экскурсии на Магнитогорском металлургическом комбинате (Магнитогорск, 2014)

С приветственной речью на открытии семинара выступили председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор Института геологии КарНЦ РАН д.г.-м.н. В. В. Щипцов, первый проректор – проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВПО «МГТУ» д.т.н., проф. М. В. Чукин и директор Института горного дела и транспорта МГТУ, д.т.н., проф. С. Е. Гавришев. Пленарные доклады на семинаре сделали члены комиссии по технологической минералогии – чл. корр. РАН А. И. Николаев (Кольское отделение, ИХТРЭМС КНЦ РАН) «Титаносиликатные функциональные материалы из продуктов переработки Кольского сырья» и д.г.-м.н. Г. Б. Мелентьев (Московское отделение, ОИВТ РАН) «Техногенные ресурсы России: приоритетные направления оценки, инновационные технологические решения и создание инвестиционно-привлекательного законодательства». Д.г.-м.н. Козлов А. П., зам. дир. ИПКОН РАН, выступил с обзорной лекцией перед студентами МГТУ о будущем горно-металлургической отрасли в России, что вызвало большой интерес у студентов и преподавателей. 21 апреля состоялась встреча А. И. Николаева и В. В. Щипцова с руководством МГТУ, на которой были обсуждены вопросы творческого взаимодействия Комиссии по технологической минералогии с МГТУ им. Г. И. Носова.

X Российский семинар по технологической минералогии на тему «Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья» состоялся 22–24 апреля 2015 г. в г. Белгороде на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.

Председатели: Глаголев С. Н. – ректор БГТУ им. В. Г. Шухова, д-р экон. наук, проф. и Щипцов В. В. – председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор ИГ КарНЦ РАН, д-р геол.-мин. наук.

В мероприятии участвовали представители академических и отраслевых институтов, ВУЗов и производственных организаций из 9 городов России: Апатиты (ГИ КНЦ РАН, ИХТРЭМС КНЦ РАН), Белгород (БГТУ им. В. Г. Шухова), Владимир (ВГУ), Магнитогорск (МГТУ им. Г. И. Носова), Москва (ФГУП «ВИМС», ОИВТ РАН, РГГУ), Петрозаводск (ИГ КарНЦ РАН, ПетрГУ), Санкт-Петербург (НЦУМС «Горный», НИУ ИТМО), Сыктывкар (ИГ КомиНЦ УрО РАН), Уфа (ООО «Клариса», БГУ). Научная программа семинара была посвящена исследованиям в области технологической минералогии и сопряженных с ней дисциплин: вопросы технологической минералогии переделов минерального сырья при переработке и утилизации отходов горно-металлургической и энергетической областей; технологическая минералогия рудных месторождений и инновационные решения в области комплексной переработки минерального сырья; роль технологической минералогии в высоких технологиях переработки минерального техногенного сырья; прогнозная оценка обогатимости природного и техногенного минерального сырья; роль технологической минералогии в технологиях переработки нерудного минерального сырья при производстве вяжущих веществ и строительных материалов.

Семинар начался с торжественной церемонии возложения цветов к памятнику академику В. Г. Шухову, которого при жизни называли российским Эдисоном и «первым инженером Российской империи».

С приветственными словами на открытии семинара выступили председатель Комиссии по технологической минералогии РМО, директор Института геологии КарНЦ РАН д.г.-м.н. В. В. Щипцов и проректор университета по научной работе проф. Е. И. Евтушенко. Участникам семинара был показан фильм об университете, который в 2014 году отметил знаменательную дату – 60-летие со дня его основания.

Рис. 25. Десятый семинар по технологической минералогии в Белгородском государственном технологическом университете (2015)

На пленарную сессию были представлены восемь докладов ведущих специалистов: Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И., Рогожин А. А. (Московское отделении, ВИМС) «Современные проблемы технологической минералогии»; Строкова В. В. (БГТУ им. В. Г. Шухова) «Эволюция подходов к выбору сырьевых материалов для производства строительных композитов»; Мелентьев Г. Б. (Московское отделение, ОИВТ РАН) «Типохимизм «экзотических» промышленно-ценных минералов редкометальных производных гранитовых, нефелиново-сиенитовых и карбонатитовых комплексов и его прикладные следствия»; Лесовик В. С. (БГТУ им. В. Г. Шухова) «Техногенный метасоматоз и проблемы повышения долговечности строительных материалов»;

Буртан С. Т., Мустафин С. К. (Башкирское отделение, ООО «Клариса», БашГУ) «Инновационные возможности технологической минералогии при производстве дорожных строительных материалов»; Николаев А. И., Щипцов В. В., Заверткин А. С., Брусницын Ю. Д., Петров В. Б., Чеканова Ю. В. (Кольское и Карельское отделегния, ИХТРЭМС КНЦ РАН, ИГ КарНЦ РАН; Прометей) «Особенности сырьевой базы Карело-Кольского региона для производства сварочных материалов»; Войтеховский Ю. Л. (Кольское отделение, ГИ КНЦ РАН) «Роль технологической минералогии в оценке промышленных перспектив кианитовых руд Кольского полуострова»; Пирогов Б. И. (Московское отделение, ВИМС) «Роль комиссии технологической минералогии РМО в развитии новых научно-прикладных направлений минералогии в технологии».

100-летие со дня создания института «Механобр» и XI Российский семинар по технологической минералогии. Конференцию открыл ректор Горного университета В. С. Литвиненко. Обращаясь к аудитории, руководитель старейшего технического вуза России подчеркнул, что потенциал отечественной минерально-сырьевой отрасли очень велик, но для того, чтобы целенаправленно работать на экономику России он должен быть в полной мере раскрыт.

В программу юбилейных мероприятий также входила работа XI Российского семинара по технологической минералогии на тему «Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии». Организаторами семинара выступали Комиссия по технологической минералогии РМО, НПК «Механобр-Техника», Институт геологии КарНЦ РАН.

Участвовали в работе около 60 специалистов, представляющих научные организации, университеты и компании России, Узбекистана и Китая. Руководителями (модераторами) семинара были чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор Л. А. Вайсберг и д.г.-м.н. В. В. Щипцов. В семинаре участвовали академик РАН А. М. Асхабов, академик РАН В. А. Чантурия, президент РМО, чл.-корр. РАН Ю. Б. Марин, д.г.-м.н., профессор Ю. Л. Войтеховский, д.г.-м.н., А. П. Козлов, д.г.-м.н., профессор С. А. Кондратьев, д.г.-м.н., профессор Р. И. Конеев (Узбекистан), д.г.-м.н. О. Б. Котова, д.г.-м.н. Е. Н. Левченко, д.г.-м.н. Т. З. Лыгина, д.г.-м.н., профессор Е. Г. Ожогина, д.г.-м.н., профессор Б. И. Пирогов, д.г.-м.н. А. Ф. Сметанников, д.г.-м.н., профессор В. В. Строкова, д.г.-м.н. И. Д. Устинов, д.г.-м.н., профессор Е. Л. Чантурия, д.г.-м.н., профессор Т. С. Юсупов, д.г.-м.н. О. А. Якушина и др.

Рис. 26. Пленарное заседание по программе XI семинара (Санкт-Петербург, 2016).
Слева направо Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И., Асхабов А. М., Марин Ю. Б., Левченко Е. Н.

Четыре доклада были представлены на пленарное заседание: Щипцов В. В.[1] (докладчик), Пирогов Б. И.[2], Ожогина Е. Г.[2], Котова О. Б.[3] (ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск; ФГБУ «ВИМС», г Москва; Институт геологии КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия) Технологическая минералогия в развитии минерально-сырьевой базы России; Асхабов А. М. (Институт геологии КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия) Минералогические следствия вторжения в «мир обойденных величин»; Юсупов Т. С.[1], Кондратьев С. А.[2] (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск; ИГД СО РАН, г. Новосибирск, Россия) Задачи обогатительной минералогии в совершенствовании раскрытия сростков и селективного разрушения минералов; Вайсберг Л. А.[1], Кононов О. В.[2], Устинов И. Д.[1] ([1]НПК «Механобр-техника, г. Санкт-Петербург; [2]МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия) Минералогия молибдошеелитовых руд; эволюция их раскрытия и предварительной концентрации.

Важными темами стали новые подходы в технологической минералогии по определению и направленному изменению физических и химических свойств руд и промышленных минералов; комплекс новых высокоэффективных технологических решений при оценке качества минерального сырья; топоминералогические исследования и геолого-технологическое картирование; прикладные математические методы в технологической минералогии; влияние эколого-экономических факторов на выбор методов и приемов технологической минералогии.

Научные результаты 10 российских семинаров изложены в статьях исследователей в виде самостоятельных ежегодных выпусков (10 томов за период 2006–2016) [23–32]. Первый выпуск был посвящен памяти проф. В. М. Изоитко.

В течение нескольких лет ежегодно проводится стажировка по минералогическим методам исследований в форме семинара *«Минералогическая школа. – «Актуальные проблемы и современные методы прикладной минералогии»* на базе отдела минералогии ФГУП «ВИМС» им. Н. М. Федоровского под руководством члена бюро Комиссии зав. отделом д.г.-м.н. Е. Г. Ожогиной. На семинаре рассматривается роль и значение минералого-аналитического изучения на современном этапе; виды и последовательность минералогических исследований горных пород, руд, техногенного сырья при сопровождении геологоразведочных работ и создании технологий переработки минерального сырья для решения поисковых, прогнозно-оценочных и технологических задач. Подобная минералогическая школа – это эффективный инструмент повышения квалификации и подготовки кадров.

Главнейшие направления развития технологической минералогии

Технологическая минералогия – наука, изучающая строение и физико-химические свойства минеральных агрегатов с целью эффективного использования минералов и содержащихся в них полезных компонентов. Новое дыхание технологической минералогии в XXI веке определяется объективной необходимостью совершенствовать технологические процессы, разрабатывать и научно обосновывать новые технологические подходы и технические решения в связи с вовлечением в промышленную сферу совершенно новых металлов и химических элементов, минерального сырья техногенного происхождения. Значительно повышается и усиливается внимание к комплексному использованию минерального сырья [33] .

Технологическая минералогия стоит в авангарде современных направлений, потому что выполнение цели и решение задач определяются на начальном этапе уровнем развития методов технологической минералогии. Новые технологии освоения направлены на вовлечение труднообогатимого и упорного сырья [34]. Разработка нового класса материалов на основе минерального сырья и повышение качества сырья до уровня чистых и суперчистых концентратов могут осуществляться за счет интенсификации технологий обогащения различных руд металлов и промышленных минералов на основе направленного изменения свойств минералов (криовоздействие, активация, выщелачивание, воздействие ультразвуком, химически активной плазмой, СВЧ-излучение, протонное облучение, воздействие мощными электромагнитными импульсами, ионная имплантация и др.) [35, 36].

В основу решений научных задач в этой области должно быть заложено понятие, что минералы (агрегатные скопления) представляют собой закономерные природные химические полисоединения. Минеральные многокомпонентные системы исследуются с применением аналитических методов и приборов нового поколения. РЗМ используются в производстве в очень малых количествах и называются «металлами-

пряностями». Выделять подобные дефицитные элементы чрезвычайно трудно [37].

Исследователями предложены разнообразные направленные изменения физико-химических свойств минералов полезных ископаемых. При различных видах энергетического воздействия возможно направленно выбрать оптимальный способ модификации, изменив целенаправленно контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения. В настоящее время эффективно используются многие приемы технологической минералогии при изучении вещественного состава руд и различных нетрадиционных видов минерального сырья в связи с разработкой нанотехнологий по извлечению полезных компонентов. Идеи, по выражению Н. П. Юшкина, находят согласование с новой научной парадигмой минералогии – изучением и оценкой минерального вещества, кроме макро-, микро- и на наноуровне с учетом структурной организацией дискретности, эволюции (онтогенез, сингенез и филогенез) во взаимодействии с живым веществом [38]. За нанотехнологическими решениями стоит будущее нашей науки и практики.

Будущее технологической минералогии неразрывно связано с ее системным инновационным подходом к минералого-технологической оценке различных видов минерального сырья [2]:

– интеграции минералогических методов с обогащением на основе синтеза знаний минералогии и развития эксперимента в технологии с целью повышения эффективности рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых;

– выявления и оценки геолого-минералогических факторов, определяющих природу технологических свойств минералов различных генетических типов, с учетом характера и глубины изменений их в гранулометрическом спектре на разных уровнях минералогической «памяти»;

– определения минералогических критериев оценки полезных ископаемых в единой геолого-техногенной системе на основе комплекса физико-химических методов и прослеживания закономерностей эволюции технологических свойств минералов в различных узлах технологической схемы;

– разработки и внедрением технологических методов селективного выделения минералов при использовании новых систем рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых;

– внедрения комплексных технологий получения новых нетрадиционных видов минерального сырья;

– совершенствования системы технологической оценки новых минеральных объектов на ранних стадиях геологоразведочных работ.

В практике геологоразведочных работ и ГОКов широко использовались достижения научных школ технологической минералогии: московской – ВИМСа (Федоровский Н. М., Гинзбург А. И., Сидоренко Г. А., Ожогина Е. Г.), ленинградской (Ревнивцев В. И., Изоитко В. М.), украинской (Пирогов Б. И.), карельской (Щипцов В. В.), казанской (Лыгина Т. З.), сыктывкарской (Юшкин Н. П., Остащенко Б. А., Котова О. Б.), новосибирской (Юсупов Т. С.) узбекской (Конеев Р. И., Туресебеков А. Х.) и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ушакова Н. Н., Фигурновский Н. А. Василий Михайлович Севергин: (1765–1826) / Ред. Шафрановский И. И. М.: Наука, 1981. 160 с.
2. Пирогов Б. И. История становления и развития технологической минералогии // Сб. статей «Прогнозная оценка технологически свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 7–37
3. Федоровский Н. М. Наши достижения в области прикладной минералогии. М.-Л.: Главная ред. геологоразведочной и геодезической литературы, 1935. 160 с.
4. Николай Михайлович Федоровский (1886–1956) / Парамонов И. В., Коробочкин Н. П. М.: Наука, 1979. 166 с.
5. Вернадский В. И. Избранные сочинения. М.: АН СССР, 1954, кн. 1. 700 с.
6. Гинзбург А. И. О минералах – геохимических индикаторах и их значении при поисках руд редких металлов в пегматитах // ДАН СССР, т. 98, № 2. 1954.
7. Гинзбург А. И., Кузьмин В. И., Сидоренко Г. А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 1981. 237 с.
8. Гинзбург А. И., Александрова И. Т. Технологическая минералогия – новое направление минералогических исследований // Разведка и охрана недр, № 3, 1974. С. 36–40.
9. Сидоренко А. В. Вступительное слово на VI съезде Всесоюзного минералогического общества 26 января 1982 г. // Зап. ВМО, ч. CXI, вып. 4, 1982. С. 369–371.
10. Изоитко В. М. Годичная сессия Всесоюзного минералогического общества // ЗапВМО, ч. CXIII,, вып. 3, 1984. С. 387–390.

11. Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов // отв. ред. В. И. Ревнивцев. Л.: Механобр, 1985. 136 с.

12. Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья // сб. научных трудов. М.: МинГео СССР, ВИМС. 1987. 146 с.

13. Технологическая минералогия главнейших промышленных типов месторождений //. Отв. ред. В. И. Ревнивцев. Л.: Ленингр. отд.-Наука, 1987. 200 с.

14. Технологическая минералогия. Библиографический указатель // Отв. ред. В. И. Ревнивцев; АН СССР (сост. В. М . Изоитко, К. И. Самерханова), Всесоюз. минерал. о-во, М-во цветной металлургии СССР, ВНИИ «Механобр». Л.: Наука, Ленингр. отд-ние, 1985.

15. Пирогов Б. И., Поротов Г. С., Холошин И. В., Тарасенко В. Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. 304 с.

16. Пирогов Б. И., Тарасенко В. Н., Холошин И. В. Принципы и методы геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых / Учеб. пособие. Киев: УМК ВО Минвуза УССР, 1989. 64 с.

17. Соколова Г. Н. VII съезд Всесоюзного минералогического общества АН СССР // ЗапВМО, ч. 116, вып. 3, 1987. 18. С. 276–281.

18. Борискин В. П., Сидоренко Г. А. Достижения и направления развития технологической минералогии в ВИМСе // Мин. сырье (вопросы фундаментальной и прикладной минералогии) № 1. М.: ВИМС. 1997. С. 181–190.

19. Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits. Leningrad: Mekhanobr, 1990. 152 p.

20. Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 532 с.

21. Карякина Т. А. Отчет Российского минералогического общества при РАН в 1998 г. // Зап. РМО, ч. 128, вып. 1, 1999. С. 131–141.

22. Технологическая минералогия. Библиографический указатель // под ред. Д. В. Ревнивцева (сост. В. М. Изоитко, И. М. Царева). СПб: 2000.

23. Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ // Мат. первого Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 163 с.

24. Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья // Мат. второго Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 199 с.

25. Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов // Сб. научных ст. Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 187 с.

26. Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы // Сб. научных ст. по мат. IV Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 192 с.

27. Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов // Сб. ст. по мат. V Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 242 с.

28. Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах // Сб. ст. по мат. докл. VI Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 164 с.

29. Прогнозная оценка технологически свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии // Сб. статей по материалам докл. VII Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 188 с.

30. Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья // Сб. статей по материалам докл. VIII Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 196 с.

31. Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений // Сб. статей. IX Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 172 с.

32. Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья // Сб. статей по материалам докл. X Росс. семинара по техн. минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 190 с.

33. Щипцов В. В. Роль и место технологической минералогии в высоких технологиях XXI века // Прогнозная оценка технологически свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. С. 37–46.

34. Конеев Р. И. Наноминералогия золота. СПб: DELTA, 2006. 220 с.

35. Лыгина Т. З. Комплексная переработка неметаллических полезных ископаемых – как основа инновационных проектов // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 28–34.

36. Чантурия В. А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал., 2005, № 12. С. 56–64.

37. Козлов А. П. Современные методы минералого-технологических исследований – основа прогнозирования и разработки высокоэффективных технологий обогащения нетрадиционного минерального сырья // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Мат. межд. совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 16–18.

38. Юшкин Н. П. Современная минералогия и новые тенденции ее развития // Новые идеи и концепции в минералогии. Сыктывкар: 2002. С. 8–9.

КОМПЛЕКСНЫЕ МИНЕРАЛОГО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ – ОСНОВА ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД И РОССЫПЕЙ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГРР

Левченко Е. Н.

ФГУП «ИМГРЭ,Москва, Россия

Геологическое изучение недр проводится по стадиям и этапам, характеризующимися различными целями, задачами и объемами. Приступая к очередной стадии работ всегда важно знать, насколько это целесообразно и полезно. Целесообразность геологического изучения зависит от качественной характеристики изучаемого минерального сырья. Качество минерального сырья, или извлекаемая ценность, определяется его технологическими свойствами.

На начальной стадии геологического изучения недр проводится их региональное геологическое изучение и прогнозирование полезных ископаемых (съемки в масштабах 1:1000000 и 1:500000). Отнесение рудных проявлений к потенциально перспективным обычно проводится по аналогии, обоснованной совокупностью геологической информации по региону и аналитическим данными. На этой стадии оцениваются прогнозные ресурсы категории P_3, которые в последнее время часто квалифицируют как минерагенический потенциал.

На стадии региональных работ, как правило, основными лабораторными методами являются химические. Применение методов минералогического анализа определяется необходимым объемом, требующимся для предварительной оценки предполагаемого промышленного типа руд.

Таблица 1

Последовательность стадийного проведения минералого-технологической оценки редкометалльных руд

Этап (стадия) геологоразведочных работ; категория ресурсов/запасов	Вид и назначение технологической оценки	Основа и глубина обогащения технологической схемы
Региональные; P_3, P_2	Априорная оценка (на основе базы данных). Предварительная оценка выявленных проявлений с минимальным объемом минералогических исследований	
Региональные; P_1	Системное минералогическое изучение объекта. Прогнозная оценка для лицензирования поисково-оценочных работ	Моделирование схем и прогнозирование результатов по данным минералогического анализа. Использование элементов МТО до черновых концентратов)
Поисковые работы P_1 (C_2)	Малообъмное технологическое опробование (МТО). Выбор объектов для оценочных работ	Традиционные для данного вида сырья (до черновых концентратов)

В общем виде лабораторно-аналитическое обеспечение региональных и поисковых геохимических работ в отрасли можно подразделить на 3 этапа:

– массовый анализ геохимических проб.

– количественные и специальные методы анализа геохимических проб.

– оптико-минералогический анализ рядовых геологических проб и продуктов технологического передела проб.

Спектральная лаборатория ИМГРЭ укомплектована современным спектро-аналитическим комплексом на основе комплекса «Поток» и анализатора спектров МАЭС-10 (рис. 1). Зарегистрированные анализатором МАЭС спектры испускания обрабатываются в программе «Атом» (рис. 2).

Рис. 1. Многоканальный анализатор атомно-эмиссионных спектров МАЭС

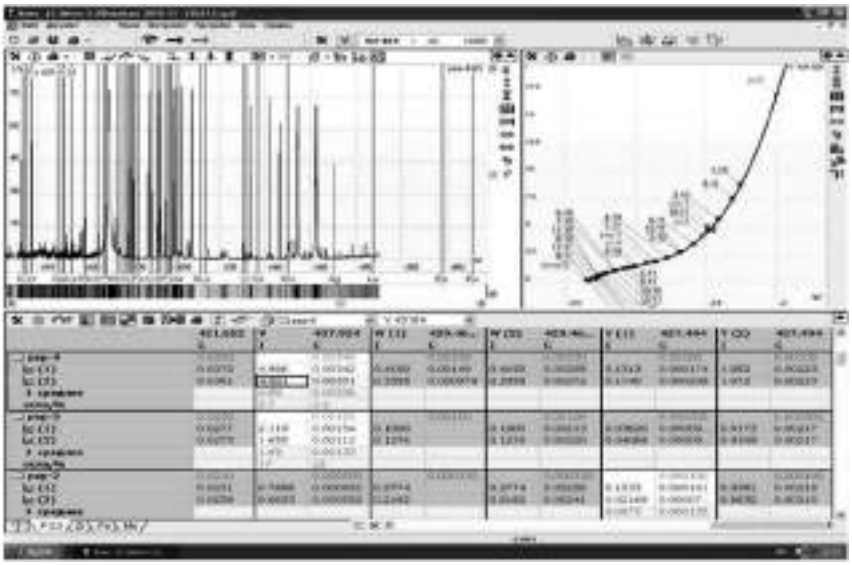


Рис. 2. Общий вид программы «Атом 3.2»

В БГГЭ ИМГРЭ разработан и внедрен интегрально-сцинтилляционный метод определения Au (спектрозолотометрия).

С 2010 года при проведении региональных и поисково-оценочных ГРР в институте используется портативный РФ-анализатор X-MET.

При проведении лито-геохимического опробования площадей, перспективных на выявление медного оруденения на Полярном Урале и поисковых работ на редкоземельные металлы иттриевой группы в Приморье был задействован портативный РФ-анализатор X-MET 5000 (рис. 3а). При проведении поисково-оценочных работ на флюсовые целестинсодержащие известняки Верхнеупьевской площади использован РФ-анализатор X-MET 7000 (рис. 3б).

а)

б)

Рис. 3. Использование портативного РФ-анализатора X-MET при проведении лито-геохимических и поисково-оценочных ГРР

По результатам работ показана обоснованность применения портативных РФ-анализаторов X-MET как при лито-геохимическом картировании перспективных площадей, так и для разбраковки первичного материала керновых проб в полевых условиях, что позволило сократить сроки

камеральных работ, количество анализов в стационарных условиях, а также оперативно корректировать проведение геологоразведочных работ.

Оценка прогнозных ресурсов категорий P_2 и затем P_1 в пределах сырьевого объекта всегда проводится с учетом данных минералого-аналитических исследований, позволяющих определить химический, минеральный, гранулярный состав руды, реальный состав и свойства полезных минералов.

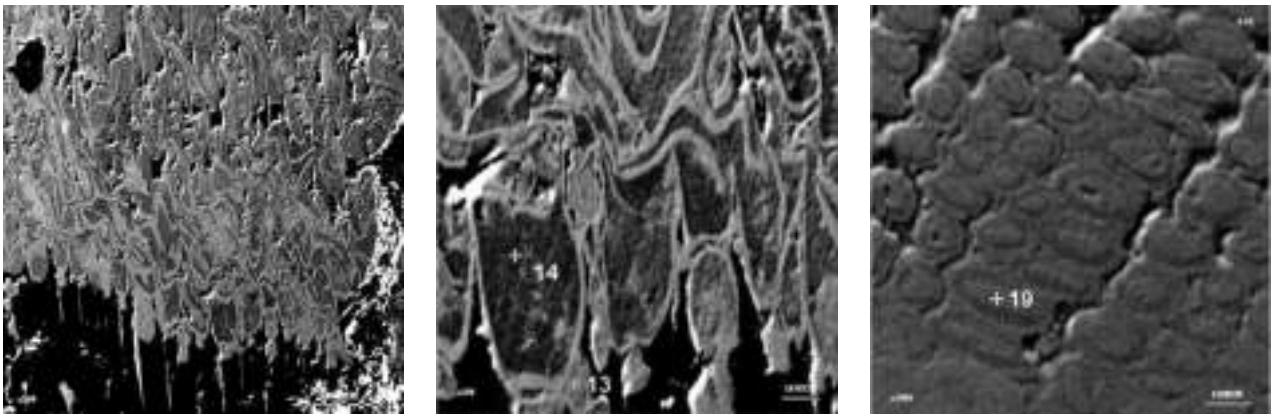
При проведении поисково-оценочных работ применяется более широкий комплекс различных методов, в том числе с использованием современных прогрессивных технологий.

На этом этапе геологоразведочных работ резко возрастает роль прикладных минералогических исследований, так как определение минерального состава и текстурно-структурных признаков руд имеет первостепенное значение для их типизации и оценки технологических свойств.

Сегодня вопросам прогнозной технологической оценки редкометалльных руд на ранних стадиях ГРР уделяется значительное внимание. Наиболее эффективной является технологическая оценка редкометалльного сырья методами прикладной минералогии.

Для прогнозирования технологии переработки руды и ожидаемых показателей обогащения необходимы сведения о ее количественном минеральном составе, включая фазы, присутствующие в весьма незначительном количестве, или имеющие микро-нанометровый размер.

Например, монацит, являющийся главным редкоземельным минералом в рудах Чуктуконского месторождения, надежно идентифицирован и изучен комплексом методов минералогического анализа, среди которых доминировали методы прецизионной минералогии (рентгенографический и микрорентгеноспектральный) (рис. 4).



а б в

Рис. 4. BSE изображения поверхности шлифа редкометалльных руд месторождения Чуктукон: а-*200, б-*800, б-*1000

Особенности распределения диоксида циркона, представленного собственными минеральными фазами, присутствующими в основном в тонкодисперсном материале циркон-бадделеитовых руд Алгаминского рудопроявления определили комплекс минералогических методов изучения (высокоразрешающая оптическая и аналитическая электронная микроскопия, рентгенографический и микрорентгеноспектральный анализы), позволивший выявить особенности рудных агрегатов (рис. 5), определить их состав, установить гранулярный состав и морфометрические характеристики циркона и бадделеита (рис. 6).

Для повышения эффективности работ на ранних стадиях геологоразведочных работ (ГРР) разработаны критерии прогноза технологических свойств редкометалльно-титановых россыпей, определены пределы значений каждого из них. Разработан рациональный комплекс минералого-аналитических методов исследования вещественного состава редкометалльно-титановых россыпей.

Прогнозная технологическая оценка МСО на поисковой стадии может привести к различным результатам. Положительная качественная оценка объекта даст возможность обосновать целесообразность продолжения геологического изучения, определить перспективность объекта, потребность и объем научно-исследовательских работ, масштабность инвестирования. Отрицательная качественная оценка объекта определит его экономическую беспер-

спективность в данный период времени и явится сигналом к прекращению каких-либо работ на объекте. Своевременное прекращение работ на минерально-сырьевом объекте позволит осуществить переориентацию материальных и людских резервов на другие, более перспективные объекты, сократить затраты и уменьшить наносимый экологический ущерб окружающей среде.

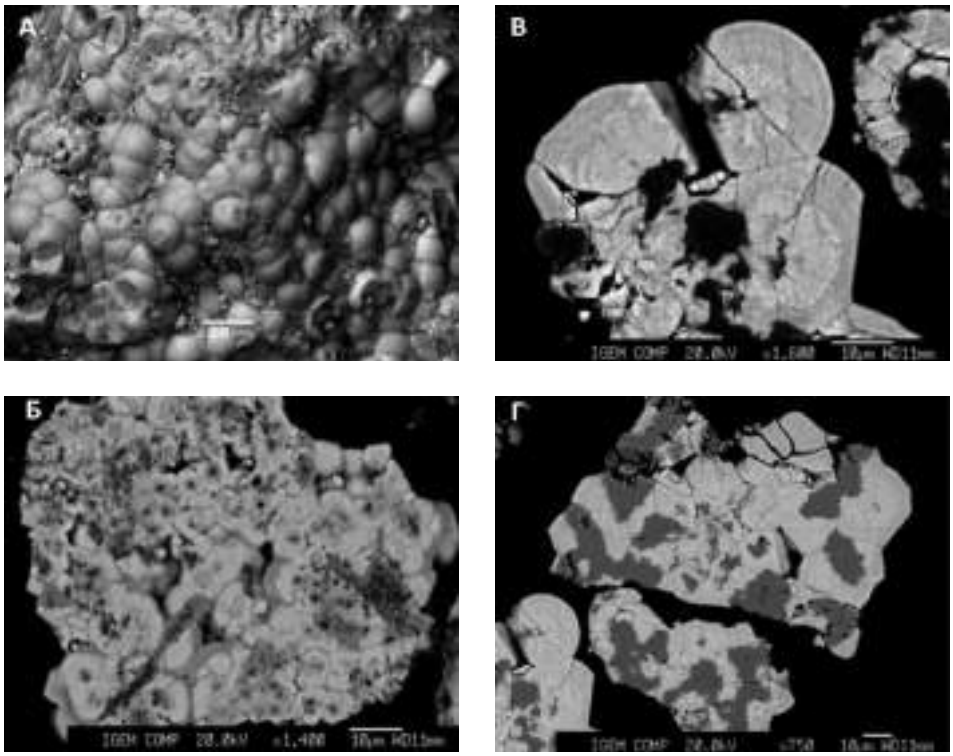
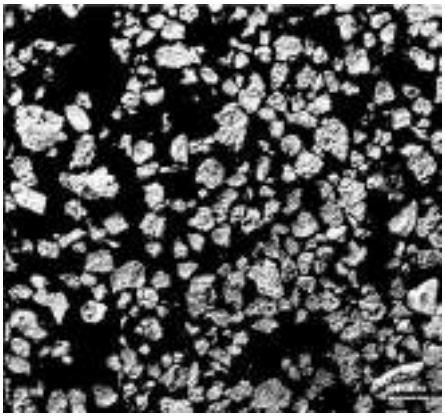


Рис. 5. Формы нахождения циркониевых фаз в породах Алгаминского рудопроявления: А – колломорфные выделения криптокристаллических агрегатов циркониевых фаз (СЭМ); Б – сингенетичное образование гидросиликатов, гидроксидов и карбонатов циркония в срастании с апатитом (мелкие черные кристаллиты), полированный шлиф; В – радиально-лучистое строение агрегатов циркониевых минералов, полированный шлиф; Г – сростки силиката и гидросиликата циркония (темные участки) с оксидами и гидроксидами циркония, полированный шлиф



Всего объектов – 238, Площадь – 1019 мкм

	Размер мкм	Периметр мкм	Форма
макс.	98,96	898,24	0,99
мин.	2,81	1,77	0,13
среднее	**30,23**	**134,65**	**0,607**

Рис. 6. Морфоструктурные характеристики цирконийсодержащих фаз

В качестве примера приведены результаты прогнозной оценки технологический свойств рудных песков титан-циркониевых россыпей 2-х прогнозно-поисковых площадей Северо-Кавказской провинции (табл. 2). В качестве эталонного объекта рассматривается Бешпагирское месторождение на котором проведены все стадии исследования – от малообъемных геологических проб до полупромышленных технологических испытаний с геолого-экономической оценкой и утверждены запасы.

Опробованный горизонт Калмыцкого участка признан бесперспективным, поскольку при

меньшей, по сравнению с Бешпагирским, глинистости пробы и более низком содержании в ней вредных примесей, пески характеризуются крайне низким содержанием титановых минералов (0,336 %) и циркона (0,075 %).

Проведенная в дальнейшем апробация на 4-х прогнозно-поисковых площадях Западно-Сибирской провинции, где в качестве эталонного объекта принято оцененное Ордынское месторождение, выявила бесперспективность 2-х участков (табл. 3). На рекомендованной для проведения оценочных работ Умытинской площади был выделен участок Правобережный и оценены запасы по кат. C_2.

Таким образом, разработанные критерии оперативной оценки технологических свойств титан-циркониевых россыпей по особенностям вещественного состава могут успешно использованы на ранних стадиях геологоразведочных работ.

Таблица 2

Апробация критериев оценки технологических свойств редкометалльно-титановых россыпей прогнозно-поисковых площадей Северо-Кавказской провинции

Фактор вещественного состава	Пределы значений	Эталонный объект с известными технологическими показателями	**Объект, оцениваемый на стадии ПОР**	**Объект, оцениваемый на стадии ППР**
		Бешпагирское	**Гофицкий уч-к**	**Калмыцкий уч-к**
Химический состав рудных песков				
содержание TiO_2 / ZrO_2	∑ н/м 1,5	1,98/0,61	1,44/0,57	0,26/0,04
содержание Cr_2O_3 / P_2O_5	н/б 0,1/0,8	0,08/0,05	0,09/0,03	н/опр
Гранулярный состав рудных песков и РМ*				
продуктивный класс песков (более 80 % РМ)	> 0,044мм	–0,14+0,074	–0,1+0,074	–0,14+0,074
глинистость, %	3–5	0,81	3,17	0,28
степень сортированности (количество классов крупности, концентрирующих более 80 % ПК**)	3	2	2	н/опр
доля ПК в крупных непродуктивных классах, % TiO_2/ ZrO_2	1,0/0,5	0,5/2,6	2,12/5,28	н/опр
доля ПК в классе – 0,044 мм, % TiO_2/ ZrO_2	5,0/5,0	0,5/2,6	2,46/9,24	1,06/0,13
степень окатанности РМ		Средняя	Средняя	Средняя
доля зерен с удлинением более 2	н/б 30	38/49/35	39/51/36	н/опр
Минеральный состав рудных песков				
содержание «условного ильменита», кг/м^3	100	121	120	23
доля ПК, распределенных в рудные минералы, % TiO_2/ ZrO_2	н/м 80/90	86/92,4	85/92	н/опр
доля сростков рудных минералов с породообразующими, %		–	–	н/опр
доля хромшпинелидов, %	н/б 0,1	0,008	0,02	зн.
доля фосфатов, %	н/б 0,1	0,015	2,294	зн.
доля радиоактивных минералов, %: монацита//метамиктного циркона	н/б 0,1 н/б 0,1	0,07 0,008	зн 0,026	0,002 0,006
Особенности свойств минералов				
содержание TiO_2, % в ильмените / рутиле	52/94	55,47/94,5	55,5/94,2	н/опр
содержание ZrO_2 в цирконе, %	60	66,2	65,8	н/опр
степень измененности ильменита		Значительная	Значительная	Значительная
доля зерен РМ с микровключениями	н/б 20	15	15	н/опр
наличие пленок и наростов на поверхности зерен		Мало	Мало	Мало
содержание лимитируемых примесей в концентратах	согласно ГОСТам		н/опр	н/опр
Прогнозируемое извлечение в концентраты, % TiO_2 / ZrO_2	н/м 86	84,73/84,77	83/80	н/опр

* РМ- рудные минералы ** ПК- полезные компоненты (TiO_2 и ZrO_2)

Таблица 3

Апробация критериев оперативной оценки технологических свойств редкометалльно-титановых россыпей прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы

Фактор вещественного состава	Пределы значений	Значимость критерия	Эталонный объект	**Оцениваемый объект**	Оцененные объекты (стадия ПОР)		
			Ордынское м-ние	**Стеклянка уч-к**	Умытинская площадь	Семеновский уч-к	Салехардская площадь
Химический состав рудных песков							
содержание TiO_2 / ZrO_2	∑ н/м 1,5	+++	1,22 / 0,26	**1,1 / 0,11**	1,12 / 0,23	0,73 / 0,053	0,4 / 0,06
содержание Cr_2O_3 / P_2O_5	н/б 0,1/0,8	++	0,031 / 0,05	**0,021/ 0,08**	0,04 / 0,01	0,041 / 0,043	0,039 / 0,01
Гранулярный состав рудных песков и РМ*							
продуктивный класс песков (более 80 % РМ)	> 0,044мм	++	0,1–0,044	**0,25–0,02**	0,14–0,02	0,06–0,02	0,28 / 0,02
глинистость, %	3–5	+++	17,48	**20,38**	**3,48**	30,42	6,17
степень сортированности (количество классов крупности, концентрирующих более 80 % ПК**)	3	+	3	**3**	3	3	4
доля ПК в крупных непродуктивных классах, % TiO_2 / ZrO_2	1,5 / 0,5	+	1,27 / 0,3	**0/0**	3,94 / 0,71	2,57 / 0,25	1,79 / 0,98
доля ПК в классе -0. 044 мм, % TiO_2 / ZrO_2	5,0/5,0	+++	9,81 / 48,56	**38,33 / 54,44**	7,23 / 10,94	43,11 / 58,92	15,13 / 5,1
Минеральный состав рудных песков							
содержание «условного ильменита», кг/м^3	80	+++	79,6		78,6	43,8	48,7
доля ПК, распределенных в рудные минералы, % TiO_2 / ZrO_2	н/м 80/90	++	83,98/ 91,6	**61,67 / 44,56**	96,84 / 95,3	79 / 88	85,46 / 93,85
доля сростков рудных минералов с породообразующими, %		++	–	**–**	–	–	–
доля хромшпинелидов, %	н/б 0,1	++	0,004	**0,012**	0,058	0,009	0,025
доля фосфатов, %	н/б 0,2	++	0,18	**0,001**	1,013	0,441	0,011
доля радиоактивных минералов, % монацит / циркон метамик.	н/б 0,1 / 0,1	++	- / 0,01	**зн / -**	0,01 / зн	0,001 / зн	0,001 / зн
Особенности свойств минералов							
содержание TiO_2 в ильмените / рутиле, %	52/94	+++	50,14 / 97,64		51,86 / 99,04	60,77 / 98,95	49,99 / 98,35
содержание ZrO_2 в цирконе, %	60	+++	65,78		66,03	65,78	65,3
степень измененности ильменита, %		+++	5	**5**	8	5	5
доля зерен РМ с микровключениями	н/б 20	++	–	**–**	–	–	–
наличие пленок и наростов на поверхности зерен		++	–	**–**	–	–	–
Прогнозируемое извлечение в концентраты, % TiO_2 / ZrO_2	н/м 86	+++	86,0 / 88,13	**71,84 / 71,86**	91,87 / 71,28	30,62 / –	89,01 / 84,77

Заключение

В едином процессе геологического изучения недр минералого-технологическая оценка минерального сырья является его неотъемлемой частью, обеспечивая выбор наиболее перспективных объектов для дальнейшего изучения на ранних стадиях и условия рационального промышленного использования оцененных месторождений.

Применение приемов и методов технологической минералогии позволяет существенно повысить уровень технологической оценки потенциального рудного сырья на ранних стадиях геологического изучения недр.

Информация, полученная в процессе прогнозной технологической оценки, существенно (2–4 недели) сокращает общий цикл геолого-минералогических, технологических и экологиче-

ских исследований объектов минерального сырья. Прогноз технологических показателей обогащения уже на ранних стадиях изучения МСО имеет большое значение для определения их промышленной значимости и принятия решения о целесообразности продолжения геологоразведочных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башлыкова Т. В., Чантурия Е. Л, Амосов Р. А., Левченко Е. Н. Использование новых методов и технологий при изучении комплексных редкометальных песков // Цв. металлы. 2000. № 5. С. 8–12.
2. Кушпаренко Ю. С. (ВИМС). Технологическая минералогия – основной метод технологической оценки потенциальных полезных ископаемых на ранних стадиях геологического изучения недр // Сб. мат. Плаксинские чтения «Развитие идей И. Н. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии». – М.: 2000. С. 8–9.
3. Левченко Е. Н. Влияние вещественного состава на технологические свойства титан – циркониевых россыпей // Разведка и охрана недр, 2004. № 11. С. 42–47.
4. Левченко Е. Н. Критерии прогнозной оценки технологических свойств титан-циркониевых россыпей на ранних стадиях ГРР // Сб. тез. Межд. научно-практической конференции НАН Украины. – Киев: 2005. С. 189–194.
5. Набелкин О. А., Филин А. С., Левченко Е. Н. Использование портативного РФ-анализатора X-MET при проведении поисково-оценочных геологоразведочных работ. // Сб. тез. YII Всеросс. научно-практической конф. «Региональные геохимические работы, как основа для оценки рудоносности и нефтегазоносности территории». – М.: ИМГРЭ, 2015. С. 100–101
6. Григорьева А. В., Левченко Е. Н., Магазина Л. О., Борисовский С. Е., Куликова И. М. Новый нетрадиционный тип циркониевого оруденения (рудопроявление Алгама). // Мат. конф. «Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования», посвященная 85–летию ИГЕМ РАН. – М.: ИГЕМ РАН, 2015. С. 186–187.
7. Левченко Е. Н., Ожогина Е. Г. Минералогия бадделеит-цирконовых руд Алгаминского месторождения // Разведка и охрана недр. – М.: 2016, № 3. С. 43–47.

МИНЕРАЛЬНЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ В ПРОДУКТАХ ПИРО- И ГИДРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТРУДНООБОГАТИМОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Мелентьев Г. Б.

ОИВТ РАН, г. Москва

Технологическая минералогия сформировалась в нашей стране как новое научное направление в системе наук о Земле и ее недрах, объединяющее различные виды минералогических исследований, необходимых для всех стадий геологоразведочных работ (ГРР), промышленного освоения и эксплуатации месторождений минерального сырья [1–5].

Принципиально важным является также развитие технологической минералогии в сопредельных отраслях исследований, среди которых выделились экспериментальная минералогия и техническая петрография, целевой синтез минералов с заданными свойствами, физическая химия пирометаллургических процессов и производств новых неорганических материалов – стекла, керамики, каменного литья и ситаллов, минеральных удобрений, цементов, бетонов и других стройматериалов и т. д. Эти и другие, в том числе – современные и перспективные направления развития технологической минералогии, оказались связанными с материало- и металловедением. Более того, формирование в технологической минералогии такого принципиально нового и многоаспектного направления как целевое изменение свойств минералов утвердили ее как раздел наук о Земле, обеспечивающий, в отличие от традиционных НИР и НИОКР, развитие в геологии *инновационно-технологического* мышления и, тем самым, непосредственную реализацию научно-технического прогресса в недропользовании.

Это технологическое направление преимущественно связано с *прямыми переделами* природного сырья, представленными горными породами, рудами и минеральными концентратами, соответственно, в целях получения новых неоргани-

ческих материалов для строительной индустрии (например, каменного литья и изделий из него, минеральной ваты, огнеупоров, цементов, бетонов и т. д.), специальных видов керамики, стекол и ситаллов, синтезированного технического кристаллосырья и искусственно обогащенных и преобразованных рудных концентратов. Очевидно, что технический прогресс и экономическая эффективность использования природного минерального сырья, исторически связанные с развитием человеческого общества, обусловлены поэтапным созданием и совершенствованием новых направлений в технологии целевых превращений исходного вещества. При этом все «ноу-хау» и производства в рассматриваемых высокотемпературных технологических процессах, как и в традиционной шлаковой металлургии, всегда сопровождались не только физико-химическими, но и петрографо-минералогическими исследованиями – изыскательскими, вспомогательными и мониторинговыми. Наиболее отчетливо необходимость и эффективность этих направлений исследований обоснованы в работах основоположника петрографии и минералогии технического камня академика Д. С. Белянкина, развиты Н. А. Тороповым, В. В. Лапиным, О. К. Ботвинкиным и другими исследователями XX столетия.

С этих позиций очевидно, что *эффективность* дальнейшего *развития* технологической минералогии, прежде всего, связана с диапазоном расширения ее задач «на стыке» технической минералогии, металловедения и материаловедения, что соответствует требованиям научно-технического прогресса в XXI веке и необходимости ускоренной замены экспортно-сырьевой модели экономики России на инновационную. Совокупность направлений, сложившихся в науках о Земле, в современных условиях требует интегрирования в научно-производственные системы, способные обеспечивать необходимые для инновационного развития *синергетические эффекты*. Применительно к переработке минерального сырья промышленно-развитые зарубежные страны с начала 80-х годов прошлого столетия ориентируются на *прямые физико-химические способы*: пиро- и электрометаллургические, различные гидро- и электрохимические, биохимические; при этом практикуется их оптимальное *комбинирование* друг с другом и с предварительным обогащением природного сырья традиционными физико-механическими способами, которые достигли предела своих возможностей или оказались непригодными для труднообогатимых и бедных видов сырья.

Направленное превращение минерального сырья в целях концентрирования рудных компонентов физико-химическими методами

Особое значение прямые физико-химические методы переработки природного и техногенного сырья приобретают при извлечении цветных, редких и благородных металлов, а также экологически лимитируемых компонентов. Как правило, существующие схемы их производства сложны, многостадийны и затратны в аппаратурном оформлении. Они не отвечают современным требованиям комплексного и экологически безопасного извлечения максимально возможного количества полезных компонентов, что обусловливает значительные потери ингредиентов природной извлекаемой ценности сырья и одновременно загрязнение среды обитания токсичными компонентами [5].

Основными *способами* направленного *изменения* свойств минералов при обогащении руд, реализованными в производственных условиях в целях их разделения и селективного концентрирования, явились: *реагентный* при флотации труднообогатимых руд с нанесением на поверхность разделяемых минералов коллоидальных дисперсоидов или, наоборот, их очисткой; *термический* как обжиг в целях селективного разрыхления или спекания руд и минералов (декрипитация сподумена), изменения степени их окисления (магнетит-гематит) и т. д.; электроимпульсный и ультразвуковой – для диспергирования исходного сырья и создания дефектов в структуре минералов; *электромагнитный, рентгенорадиометрический* и *люминесцентный* – для сепарирования руд и минеральных концентратов и т. д. Все эти методы преимущественно направлены на изменения свойств промышленно-ценных или сопутствующих им минералов с *поверхности*, что позволяет превращать труднообогатимое сырье («упорные руды») в обогащаемое традиционными способами.

Примерами реализации прямых физико-химических способов переработки исходного минерального сырья и отходов его обогащения, прежде всего, служат различные методы *гидрогеохимического выщелачивания и глубокой переработки* исходного минерального сырья и отходов его обогащения, т. е. техногенных ресурсов. Они получили широкое развитие и известность как методы поверхностного кучного и скважин-

ного подземного выщелачивания (ПСВ) применительно к добыче урана, золота и меди.

Последовательно осваивались технологии извлечения этими методами, в том числе непосредственно из недр, *урана* (в СССР – с начала 60-х годов), *золота* (в США, Канаде, странах Южной Америки, Австралии и ЮАР – с начала 80-х годов) и, наконец, в последнее время – *меди* (за рубежом и в России). Об эффективности кучного и подземного выщелачивания золота свидетельствуют данные об увеличении его выпуска с применением этих методов в период с 1982 г. по 2001 г. Канадой в 2,5 раза, США в 6 раз, Австралией в 10 раз, Перу в 13 раз и т. д. Сравнительно с этими данными СССР и Россия, с учетом специфики «переходного периода», смогли увеличить подобный же выпуск золота всего лишь в 1,5 раза. Соответственно, и выпуск меди методами выщелачивания в США за 10 лет увеличился десятикратно, в то время как в России и других странах СНГ эти методы пока получают ограниченное развитие.

Особое значение методы выщелачивания приобретают в нашей стране в связи с назревшей необходимостью организации производств рассеянных редких металлов – Re, In, Bi, Ge, Sc, Ga и других из различных видов рудного сырья и техногенных образований. Тем более, что многие из них как правило в той или иной степени ассоциируют с наиболее востребованными цветными (Cu, Zn, Pb, Sb и др.) и благородными (Au, Ag, платиноиды) металлами, а также с экологически лимитируемыми микрокомпонентами 1-го класса опасности (As, Cd, Hg, Cd, Tl и др.). Исследованиями О. Е. Юшко-Захаровой [6] выделены устойчивые парагенетические ассоциации промышленно-ценных микрокомпонентов в медно-никелевых и медно-цинковых (колчеданных) рудах, в которых значительная часть микрокомпонентов присутствуют в виде собственных минералов или элементов-примесей (табл. 1). По совокупности причин российские предприятия горнопромышленного и химико-металлургического комплексов (ГПК и ХМК) не извлекают сопутствующие меди, никелю и цинку рассеянные редкие металлы (за исключением небольших количеств In, Ge, Se, Te, Bi), которые концентрируются в различных отходах обогащения и особенно переделов. В частности, установлена уникальная способность рения как дефицитного стратегически важного металла накапливаться в продуктах обогащения и переделов относительно содержаний в исходном медно-сульфидном сырье с превышением их на несколько порядков. Этим обусловлено обнаружение его собственной микроминеральной формы концентрации джезказганита в продуктах обогащения руд Джезказгана (Казахстан) и относительно недавно открытого второго рениевого минерала – рениита в продуктах вулканических возгонов (Кудрявый, о. Итуруп).

Исключением является золото, микроминеральные формы которого в сульфидном виде детально изучены Е. Н. Белогуб (2007) и И. В. Викентьевым [7]. Как известно, его добыча на Урале и особенно в Башкирии осуществляется издавна из охристых руд зон окисления и «железных шляп» сульфидных месторождений, сформированных в процессе разложения золотосодержащего пирита и других сульфидов в гипергенных условиях.

Пиритные концентраты и огарки представляют собой ценные виды техногенных минерально-химических ресурсов, складируемых ГОКами при обогащении сульфидного медно-цинкового и свинцово-цинкового сырья и, соответственно, накопленных химико-металлургическими предприятиями в период производства серной кислоты за счет переработки исходного пиритного сырья. Оба вида ресурсов обогащены железом и серой, цветными (Cu, Zn, Pb, Co, Sb и др.), благородными (Au, Ag) и рассеянными металлами (Se, Te, Bi, Cd, Tl и др.), включая токсиканты 1-го и 2-го классов опасности. Последнее обстоятельство с учетом интенсивной окисляемости и разложения пиритного сырья как источника образования слабых сернокислотных растворов в условиях гипергенеза обусловливает определенную экологическую опасность его складирования и длительного хранения. Пиритные огарки как отходы бывших сернокислотных производств в настоящее время сосредоточены в 4-х наиболее крупных хранилищах объемом более 1 млн. т каждое (всего 26 млн т).

Согласно исследованиям А. И. Заболоцкого пиритные огарки содержат 1,1–2,1 г/т золота, 20–30 г/т серебра, 0,3–0,4 % меди, 0,7–1,0 % цинка и 40–50 % железа, а с их поставками на цементные заводы ежегодно утрачивается 0,5 т золота. В частности, за 50 лет на Новороссийские заводы в составе пиритных огарков отправлено до 10 т золота [20, 21]. Утвержденные ГКЗ запасы Au, Ag, Cu и Zn специально разведанного Кировоградского техногенного месторождения эквивалентны 13 т золота (от содержаний 4,5 г/т условного золота).

Таблица 1

Формы нахождения элементов-примесей в главных минеральных ассоциациях медно-никелевых и медно-колчеданных месторождений [6]

Тип месторождения и главные минеральные ассоциации	Характерный комплекс элементов-примесей	Минеральные формы
Медно-никелевый		
пирротин-пентландит-халькопиритовая	Co, Rh, Ir, Ru, Pd, **Pt***, Os, Mo, Re, **As**, Se, Te	ферроплатина [PtFe], сперрилит [$PtAs_2$]
халькопирит-кубанит-талнахитовая	**Pt**, **Pd**, **Sn**, **Sb**, **As**, **Bi**, **Ag**, **Au**, Co, Se, **Te**, **Zn**, Cd, Ga, Ge, In, Tl	ферроплатина [PtFe], звягинцевит [Pd_3(SnPb], масленицковит (атакит-рустенбургит) [$(Pt, Pd)_3Sn$], таймырит [$(Pd, Pt, Cu)_3Sn$], нигглиит [PtSn], станнопаллагит [Pd_3Sn_2], сперрилит [$PtAs_2$], геверсит [$PtSb_2$], плюмбопалладинит [Pd_3Pb_2], полярит [Pd(Pb, Bi)], стабиопалладинит [Pd_3Sb], маякит [$(Pd, Ni)_2As$], купроаурит [$(Au, Pd, Pt)Cu_3$], электрум [AuAg], кюстелит [AgAu]
халькопирит-борнит-миллеритовая	**Pd**, **Pt**, **Te**, **Se**, **Bi**, **Pb**, **Ag**, **Au**, **Co**, **Cd**, **Tl**	куперит [PtS], высоцкит [(Pd, Ni)S], мончеит [$Pt(Bi, Te)_2$], майченерит [PdBiTe], котульскит [Pd(Te, Bi)], фрудит [Pd_2Bi], соболевскит [PdBi], теларгполит [$(Pd, Ag)_4Te$], зигенит [$(Co, Ni)_3S_4$], линнеит [Co_3S_4], алтаит [PbTe], креннерит [$AuTe_2$], гессит [Ag_2Te], имгрэит [NiTe], сильванит [$AuAgTe_4$], клаусталит [PbSe], шадлунит [$(CuFe)_8PbCdS_8$], толкусит [$Cu_{3-x}Tl_2Fe_{1+x}S_4$]
Медно-цинково-колчеданный		
пиритовая	Se, Te, **Bi**, **Ag**, **Au**, Co, As, Sb	алтаит [Pb, Te], теллуровисмутит [Bi_2Te_3], волынскит [$AgBiTe_2$], раклиджит [$(Pb, Bi)_3Te_4$], электрум [AuAg]
халькопирит-сфалеритовая	Cd, In, Ge, Ga, Tl, Se, Te, Bi **Au**, **Ag, Hg**, **As**, **Sb**, Pt, Pd, Rh	алтаит [PbTe], теллуровисмутит [Bi_2Te_3], колорадоит [HgTe], гессит [Ag_2Te], креннерит [$(Au, Ag)Te_2$], калаверит [$AuTe_2$], электрум [Au, Ag], арсенопирит [FeAsS], теннантит [$Cu_{12}As4S_{13}$], тетраэдрит [$Cu_{12}Sb4S_{13}$]
пирротин-магнетит-халькопиритовая	Se, **Te**, **Bi**, Co	теллуровисмутит [Bi_2Te_3]
борнит-теннантитовая	**Ge**, **Sn**, **As**, **Ag**, **Au**, Se, Te	V-As-германит [$Cu_3(As, Ge, V)S_4$], реньерит [$(CuFe)_3(Fe, Ge)S_4$], моусонит [Cu_7FeSnS_8], колусит [$Cu_3(As, Sn, Ge, V)S_4$], Au самородное, прустит [Ag_3AsS_3], макинстриит [$Cu_{0,8}Ag_{1,2}S$]

*Выделен элемент, образующий минеральную форму.

Для этого месторождения разработана и апробирована двухстадийная технология: для извлечения меди – с использованием подземных слабокислых «рассолов» техногенного водного горизонта месторождения с содержаниями 1,2 г/л Cu и 0,7 г/л Zn, а затем – извлечения золота с применением тиокарбомидного метода [8]. В настоящее время пиритные концентраты как “отходы” обогащения меднорудного сырья, сбрасываемые в хвостохранилища уральскими ГОКами [9], стали складироваться как ценный техногенный ресурс и источник микрокомпонентов – суперэкотоксикантов (As, Hg, Cd и др.).

В пиритных концентратах из медно-цинковых руд Урала установлена 3-х кратная концентрация таллия (до 28–36 г/т) относительно его содержаний в исходном сырье (до 11 г/т), максимальная – селена (до 210 г/т) сравнительно с содержаниями в исходных рудах (79–146 г/т) и выделяемых из них медных (113–180 г/т) и цинковых (24–42 г/т) концентратах, в то время как содержания теллура в этих пиритах (43–63 г/т) значительно ниже чем в рудах (74–191 г/т), медных (156–159 г/т) и цинковых (61–75 г/т) концентратах. Кроме того, для пиритных концентратов из медных руд характерно присутствие индия (9,5 г/т) и галлия (8 г/т). В пиритах молибденовых руд концентрация таллия достигает 800 г/т. За рубежом пиритные концентраты, содержащие золото, служат товарным продуктом и даже предметом экспорта на мировом рынке.

Отечественные инновационные разработки и зарубежный технологический опыт переработки пирита и пиритных огарков, позволяют рассчитывать не только на их переработку в местах складирования, но и на организацию экспор-

та – например, с Урала, Забайкалья и Дальнего Востока – в Японию, где на заводе «Тобато» ежегодно перерабатывалось 250 тыс. т пиритного концентрата, содержащего 1 % г/т Au; 10 г/т Ag; 0,33 % Cu; 0,55 % Zn и 50 % серы, по обжиговохлоридно-возгонной схеме. Извлечение золота и серебра составляло (%) по 63, меди – 78, цинка – 60, серы – 95,2. Содержание железа в обожженных окатышах – 61,9 %.

Кроме того, перспективы организации в нашей стране стабильного выпуска попутных благородных металлов связаны с техногенными ресурсами предприятий черной металлургии – на КМА [10], ОАО "Карельский окатыш" и др. [11].

Скандий как рассеянный редкий металл, подобный рению по востребованности высокотехнологичными отраслями промышленности (АРКТ и др.), извлекается как попутный особо ценный микрокомпонент при переработке ильменитовых концентратов и из урансодержащих растворов, но может извлекаться и из отходов обогащения титаново-железорудного и глиноземного (бокситового) сырья. В первом случае его практически интересные содержания обнаружены еще в середине прошлого века Л. Ф. Борисенко (ИМГРЭ АН СССР) в силикатной (диопсид) части отходов Качканарского ГОКа, а во втором – в поликомпонентных красных шламах североуральских бокситов. Несмотря на содержания скандия в обоих видах техногенного сырья ≥100–150 г/т, достаточные для его промышленного извлечения, пока эти побочные производства не налажены. В то же время очевидны принципиальные возможности холдинга "РУСАЛ" осуществить инновационно-технологический прорыв на базе собственного производства алюминия и указанных перспектив получения скандия в организации выпуска Sc-Al-х сплавов и лигатур, востребованных ОПК и гражданским машиностроением.

Не менее актуальными представляются перспективы извлечения скандия с востребованными "Росатомом" цирконием и гафнием, а также танталом и РЗМ из бадделеитовых концентратов, выпускаемых и экспортируемых ОАО "Ковдорский ГОК". Согласно нашим исследованиям комплексного ковдорского сырья и бадделеита, в нем, кроме диоксида циркония, содержатся 200 г/т скандия и 13–15 кг/т гафния, а также 1–1,5 кг/т оксида тантала [4, 5]. Товарный концентрат бадделеита содержит 770 г/т Sc_2O_3, а отходы его обогащения 580–690 г/т. Таким образом, несмотря на известные успехи советской науки в реализации промышленных технологий извлечения рассеянных редких металлов из титанового сырья (ванадий), глиноземного – нефелинового и бокситового (галлий), угольного (германий) и ряда других, включая экологически лимитируемые, рассматриваемая проблема получения их широкого ассортимента в новой России остается нерешенной на уровнях инвестирования и организации производств.

С учетом многокомпонентного состава различных руд и концентратов, отходов их обогащения и химико-металлургических переделов, обогащенных сопутствующими особо ценными цветными и рассеянными редкими и благородными металлами, решение проблемы их извлечения практически невозможно без использования новейших методов технологической минералогии и комбинированных обогатительно-передельных схем на всех стадиях их разработки и внедрения, причем как в действующие производства, так и в создаваемые.

Широкий диапазон использования *пирохимических процессов* глубокой переработки минерального сырья сопровождается деструкцией и фазовыми превращениями исходных минеральных индивидов в новообразования с заданными свойствами и составом. Наиболее яркими примерами подобных производств, наряду с каменным литьем, получением специальных керамических материалов, стекол, ситаллов и синтезом фторфлогопита из расплавов, могут служить процессы получения ферониобия их пирохлоровых концентратов, получение «синтетических» *титанатов*, обогащенных титаном относительно исходных титаномагнетитов [12], извлечение *тантала* из отвальных шлаков оловоплавильных заводов [13] и т. д. При этом в соответствующих расплавах продуктивной шихты используется в заданных целях их фазовая *несмесимость* (immiscibility) или *ликвация* с образованием эмульсионных структур, сфероидных обособлений и слоев сосуществующих жидких фаз контрастного состава. Это физико-химическое явление, характерное для надликвидусной области неравновесных систем, обнаруживается как в восстановительной, так и в окислительной среде.

Минералообразование в продуктах ликвационной плавки флюсованной рудной шихты с разделением и избирательным концентрированием в несмешивающихся расплавах особо ценных и лимитируемых компонентов

Ликвационная плавка как нетрадиционный техноэкологический способ глубокой переработки различного по составу (силикатного, карбо-

натного, сульфидного) природного и техногенного рудного сырья с избирательным концентрированием и сепарированием полезных *рудных* и *лимитируемых* компонентов в несмешивающихся жидких фазах расплавов, а также получением из горно-химического сырья фосфатных и калиевых товарных *продуктов*, представляет собой новое *приоритетное* направление в создании отечественных инновационных технологий, заслуживающее внедрения в традиционные схемы обогащения и рекомендуемое для использования в комбинированных обогатительно-передельных схемах переработки техногенного сырья [14].

В ОИВТ РАН с 2014 г. по инициативе автора были организованы систематические экспериментальные исследования возможностей использования ликвационной плавки в качестве способа разделения и избирательного концентрирования в несмешивающихся жидких фазах промышленно-ценных компонентов тонкодисперсных редкометально-редкоземельных руд месторождения Томтор, не поддающихся обогащению традиционными физико-механическими методами. Результатом экспериментальных плавок флюсованной шихты охристых руд переотложенной коры выветривания карбонатитового комплекса Томторского массива явилось образование в тигле контрастных по составу и структуре слоев: верхнего железисто-силикатного, обогащенного ниобием, и нижнего солевого карбонатно-фторидно-фосфатного, обогащенного РЗМ. Высокая кристаллизационная способность солевого расплава обусловила преимущественно кристаллическую матричную структуру нижнего слоя, в то время как верхний слой представлен стеклофазой (рис. 1).

Микрозондовый анализ позволил обнаружить принципиальные различия в проявлениях микронеоднородности обеих матриц и их состава. Во всем объеме силикатного слоя распространены микросфероиды обособлений редкоземельного солевого расплава (рис. 2а), в то время как для нижнего солевого характерно подобное же распределение («взвесь») микросфероидов силикатного ниобийсодержащего расплава (рис. 2б). В раскристаллизованном солевом слое расплава обнаружены микрофазы редкоземельных новообразований (рис. 2в): со структурами монацита (в – 1) и двойных La-Na-x фосфатов (в – 2). Данные табл. 2 свидетельствуют об избирательном концентрировании в верхнем слое 4,05–9,67 % Nb_2O_5, 11,57–16,96 % Fe_2O_3, 2,66–3,03 % P_2O_5, 1–1,5 % Ce_2O_3, в то время как в нижней сосредоточены 16,20–20,46 % Ce_2O_3, 8–8,92 % La_2O_3 и 5,30–5,46 % Nd_2O_3 при 8,72–9,00 % Nb_2O_5, 1,49–1,80 % Fe_2O_3 и 18,53–21,60 % P_2O_5. Очевидно, что дальнейшая переработка этих плавленых концентратов как промпродуктов в целях получения конечной металлопродукции может быть осуществлена с применением восстановительной плавки верхнего слоя для получения феррониобия и гидрохимическими методами – в целях выделения редкоземельных продуктов. В настоящее время в обоих направлениях осуществляются необходимые экспериментально – технологические исследования, в результате которых Л. М. Делицыным из солевого слоя выделены образцы редкоземельной продукции.

Таблица 2

Химический состав (% масс. железисто-силикатных и фосфатно-солевых микросфероидов в продуктах расслоения расплава флюсованной шихты редкометалльно-редкоземельной коровоохристой руды Томтора (уч. Буранный)

Микросфероиды	Содержание компонентов									
	P_2O_5	SiO_2	Fe_2O_3	∑RO	Na_2O	F	Nb_2O_5	La_2O_3	Ce_2O_3	Nd_2O_3
Силикатные № 56 (1100 °)	3,03	30,16	16,96	1–2	10,36	3,45	9,67	–	1–1,5	–
Солевые № 56 (1100 °)	21,60	–	1,80	12,00	9,00	7,10	–	8,00	16,20	5,30
Силикатные № 57 (1000 °)	2,66	44,08	11,57	1–2	10,91	3,96	4,05	–	1,60	–
Солевые № 57 (1000 °)	18,53	–	1,49	10,19	8,72	19,22	–	8,92	20,46	5,46

Таким образом, в ОИВТ РАН впервые доказана возможность использования ликвационной плавки в разработках каскадной обогатительно-передельной схемы переработки уникального по составу, но труднообогатимого томторского сырья [15]. Тем самым обоснована перспективность применения этого прямого способа в переработке не только остаточных фосфатно-ниобиевых кор выветривания Белозиминского месторождения, но и других, более богатых и связанных с гипергенными процессами изменения коренных карбонатитовых руд (Томтор, Чуктукон и др.). Есть основания полагать, что при соответствующей поддержке специализированными государственными ведом-

ствами и заинтересованными недропользователями положительные результаты лабораторных исследований будут реализованы на уровне пилотных и опытно-промышленных проектов.

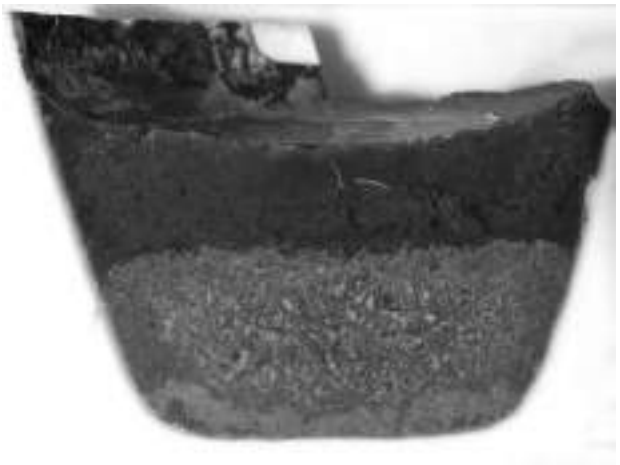
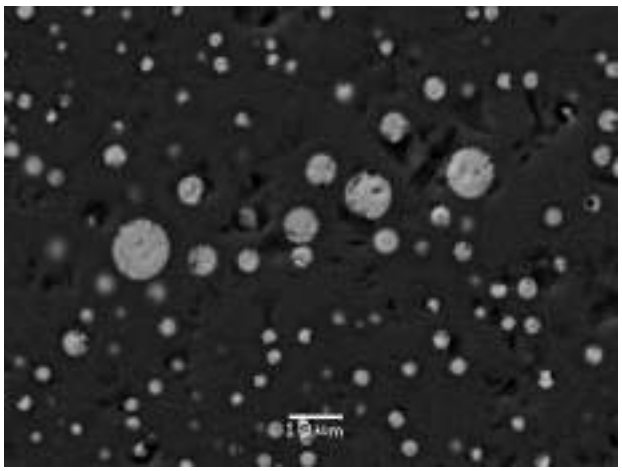
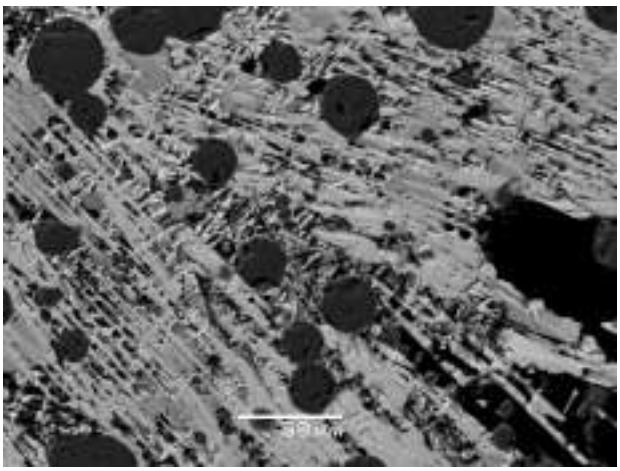


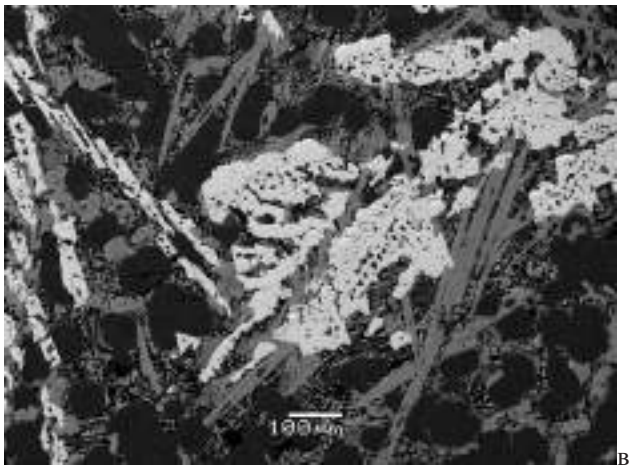
Рис. 1. Продукты расслоения расплава редкометалльно-редкоземельной охристой руды Томтора в тигле на несмешивающиеся жидкие фазы: верхний – железисто-силикатный слой с ниобием, нижний – солевой с редкими землями



а



б



в

Рис. 2. Микрофотографии фазовых новообразований в продуктах плавки монацит-пирохлор-крандаллитовой руды Томтора (уч. Буранный)

В решении проблем переработки труднообогатимого и бедного минерального сырья, особенно отходов его обогащения и переделов, ликвационная плавка как один из пирохимических методов представляется безальтернативной традиционному обогащению и обладающей целым рядом преимуществ относительно различных методов выщелачивания, используемых в техноло-

гических схемах для извлечения особо ценных компонентов.

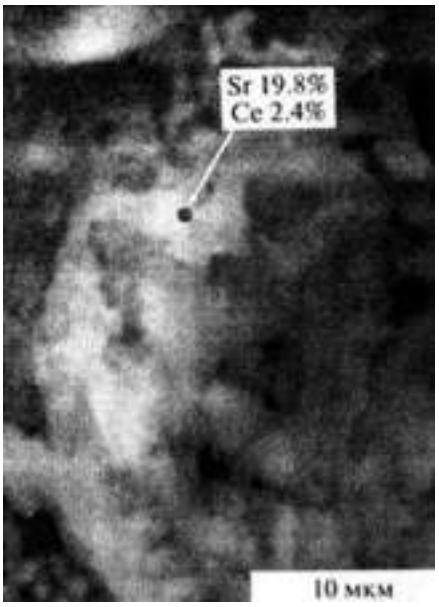
Извлечение профилирующих полезных компонентов и сопутствующих элементов-примесей в несмешивающиеся жидкие фазы, фиксируемые закалкой расплавов или выпускаемые в жидком состоянии в соответствии с их распределением по высоте тиглей, варьирует в пределах 75–95 %. В случае необходимости их доводка до конечных продуктов осуществляется либо восстановительной плавкой полученных промпродуктов, либо гидрохимическими, прежде всего, сернокислотными методами. Пирохимические способы обогащения и переработки указанных типов минерального сырья с использованием ликвационной плавки защищены отечественными, в том числе – авторскими свидетельствами СССР на изобретения и патентами РФ на полезные модели. С изложенных позиций предпочтение отдается нетрадиционным пиро- и гидрохимическим методам обогащения и переработки техногенного сырья, соответствующим концепции прямых переделов, включая их модифицирование и комбинирование друг с другом.

Редкометалльное минералообразование в продуктивных «отходах» кислотной переработки поликомпонентного техногенного сырья

Фосфогипс как объемный отход сернокислотной переработки хибинского апатита на минеральные удобрения привлекал внимание с 30-х годов прошлого столетия в связи с «наследованием» им техногеохимической специфики перерабатываемого горно-химического сырья [16].

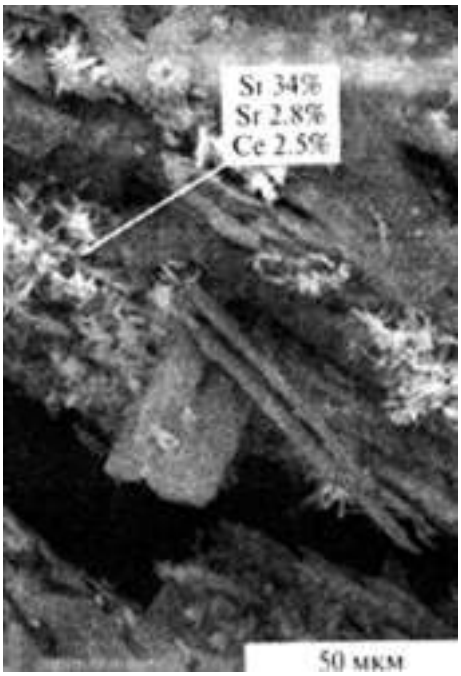
Исследования образцов фосфогипса (свежего и лежалого) из отвалов Балаковского завода минеральных удобрений (БМУ) позволили впервые выявить [17] в среднетяжелой (2,3–2,8 г/см^3) и тяжелой (>3 г/см^3) фракциях фосфогипса новые, уникальные минеральные образования [17]: а) мелкочешуйчатые (снеговидные) выделения стронций-содержащего гипса на крупных кристаллах минералов (гипса, кварца, сфена и эгирина) с содержанием стронция от 1,3 до 4,73 %; б) мелкие коллоидные выделения на более крупных кристаллах разных минералов, в химическом составе которых установлены редкие металлы – стронций до 18–20 % и церий от 1,5 до 2,2 %; в) мелкокристаллические (игольчатые и нитевидные) новообразования редкоземельного сульфата стронция Sr, Ce, La, Nd(SO_4) с содержанием стронция от 23,3 до 35,6 %, церия 1,1–2,8 %; лантана 1,71–1,78 % и неодима – до 1,42 % (техногенный редкоземельный целестин); г) стрытокристаллическая минерализация, условно диагностируемая как редкометалльный фосфатно-силикатный гель с содержанием фосфора 9,3–16,2 %, стронция до 12,2 % и РЗМ (La, Ce, Nd .... до 22 %). Выявление новообразованных и, возможно, видоизменяющихся в условиях складирования минеральных фаз фосфогипса позволяет положительно оценить перспективу его промышленного использования и создания безотходных технологий комплексной переработки.

а



б

Рис. 3. Минеральные фазы, содержащие стронций и РЗМ, в свежем выработанном фосфогипсе: а) мелкочешуйчатый (снеговидный) стронцийсодержащий гипс; б) коллоидные выделения на крупных кристаллах



а

б

Рис. 4. Минеральные фазы в лежалом фосфогипсе: а) мелкокристаллические (игольчатые и нитевидные) новообразования редкоземельного сульфата стронция; б) редкометальный фосфат-силикатный гель

В настоящее время специалистами различных научных и научно-производственных организаций проводятся НИР и НИОКР по извлечению РЗМ из отходов серно- и азотно-кислотной переработки хибинского апатита в 3-х направлениях: 1 – из нитратно-фосфатного раствора, в котором после вскрытия апатита сосредоточено 100 % редких земель (ОАО «Акрон»); 2 – из экстракционной фосфорной кислоты – продукта переработки апатита по сернокислотной схеме («ФосАгро»); 3 – из фосфогипса, содержащего 0,35–0,5 % РЗМ (ООО «ЛИТ» – группа компаний «Скайград»). Масштабы накопления фосфогипса в нашей стране составляют сотни млн. т, в том числе на заводах по выпуску минеральных удобрений корпорации «ФосАгро» – от 45 до 130 млн. т, что позволяет оценивать их в качестве техногенных месторождений РЗМ с сопутствующими стронцием и фтором, а также как потенциальный источник гипса для стройиндустрии [16]. Последнее обстоятельство и необходимость обезвреживания фосфогипса путем извлечения из него редких и радиоактивных микрокомпонентов, а также остаточной серной и новообразованной фосфорной кислоты обусловили опережающую разработку группой строительных компаний «Скайград» (г. Королев) современной технологии получения как товарного гипса, так и химических концентратов РЗМ, включая разделение их на группы. Эта научно-производственная фирма создает автоматизированную линию из каскада центробежных экстракторов для получения групповых и индивидуальных концентратов РЗМ и демонстрирует опытные образцы полученной товарной продукции – групповые концентраты РЗМ среднетяжелой группы и дидима, высокочистых оксидов церия, неодима и лантана [18].

К сожалению, пока остаются нереализованными своевременные рекомендации автора о необходимости изучения на заводах минеральных удобрений распределения в материальном потоке производства РЗМ и сопутствующих микрокомпонентов в целях выделения и оценки технологических узлов их концентрации, а в хранилищах фосфогипса – проведения детального минералого-геохимического картирования в целях площадного оконтуривания и оценке участков концентрирования различных групп РЗМ, включая их распределение на глубину в разрезах до десятков метров. Тем самым будут обеспечены как необходимая стабильность и эффективность производства химических концентратов РЗМ, так и изучена возможность использования методов предварительного обогащения лежалого фосфогипса с повышенными содержаниями новообразованных минералов – концентраторов РЗМ и других микрокомпонентов.

Минеральное новообразование в горнопромышленном техногенезе как геотехноэкологический фактор эффективности и безопасности производственной деятельности

Наиболее убедительными результатами изучения минеральных новообразований в техногенных процессах являются [19]:

1) сульфатных – как следствие применения известкового метода осаждения вредных примесей на станциях нейтрализации сбросов медно-рудных ГОКов

2) хлоридов, фторидов, сульфатов и других минералов горелых угольных отвалов

3) продуктов переработки шлакозольных отходов угольных ТЭС

4) солевых и других минеральных отложений в нефтепромысловом оборудовании.

Сульфатные новообразования характерны для всей системы нейтрализации сбросов шахтных, подотвальных и технических пульпообразующих вод медно-сульфидных ГОКов – от стенок емкостей на станциях нейтрализации, обводных каналов, дренирующих подотвальные воды, отводных труб и каналов, прибрежных зон искусственных водохранилищ – приемников промстоков, их трубных выпусков и, наконец, дна малых рек как конечного пункта сброса промстоков. Согласно нашим наблюдениям и исследованиям в полевых условиях содержаний сульфат-иона, pH и общей минерализации указанных сбросов максимальные значения этих параметров характерны для подотвальных вод. Следовательно, основным загрязнителем коллективных сбросов ГОКа сульфат-ионом являются кислые подотвальные воды, в меньшей степени – фильтрат пульпы с хвостохранилища и минимально – шахтные воды.

В целях очистки кислых обогатительных стоков от экологически опасных профилирующих компонентов и частично серы (SO_4) на станции нейтрализации (СТН) осуществляется их обработка известковым молоком с удалением взвесей и осадков карбонатных минеральных образований. В результате во взвесях, согласно нашим исследованиям, концентрируются Fe, Zn, Cu и высокотоксичные As, Cd, Hg, U, Th и др.

В коллективных карбонатно-сульфатных сбросах со станции нейтрализации содержится также не осажденная часть катионов профилирующих (Cu, Zn) и сопутствующих (Fe, Ba и др.) металлов, которые, помимо гипса и кальцита, выделяются и осаждаются на стенках труб и в донных отложениях водотоков и водоемов. В частности, установлено твердое покрытие из смеси гипса, кальцита и других сульфатов и карбонатов на дне водотоков – конечных пунктов сброса промстоков (рис. 5а). Здесь же обнаружены белые «сталактитоподобные» образования, округлые и концентрически зональные в поперечном сечении как продукты минералообразования на растительном мусоре, сыгравшем роль «затравки» и центров кристаллизации (рис. 5б).

Рис. 5. Карбонатные и сульфатные минеральные новообразования в сбросах со станции нейтрализации

Очевидно, что это один из существующих факторов техногенеза и накопления экологического ущерба от деятельности уральских медно-сульфидных ГОКов, т. к. с заменой труб и платой за загрязнение среды обитания связаны значительные издержки. Тем более что дополнительные многокилометровые трубопроводы сбросов с ОБОФ и СТН распространяют негативное экологическое воздействие на среду обитания далеко за пределы промплощадок горно-обогатительных комплексов. Эти новообразования, как и слагающие их минералы, их типохимизм и последовательность минералообразования в настоящее время изучаются и моделируются.

Полиминеральные новообразования в горелых отвалах (терриконах) Челябинского буроугольного бассейна обнаружены и изучены Б. В. Чесноковым, заложившим более 30 лет назад основы нового научного направления «минералогия техногенеза». Геохимическая специфика бурых углей и термогидрохимические условия минералообразования в горящих терриконах обусловили возможности формирования типоморфной парагенетической ассоциации примерно из 40 различных минералов. Среди них выделяются группы хлорсодержащих (16 минералов) и обогащенных фтором (14 минералов), включая хлориды и фториды кальция, магния и др. [20]. Результаты этих исследований несомненно могут иметь прикладные следствия в разработках техноэкологических способов пожаротушения для горючих полезных ископаемых и складируемых отходов их переработки. Как правило, самовозгорание отходов угледобычи и нефтепереработки сопровождается выбросами целого ряда токсичных соединений, как неорганических, так и особо опасных металлоорганических. Поэтому особое значение приобретают разработки способов предупреждения самовозгорания вредных выбросов, чему способствует научная информация о рассматриваемых процессах минералообразования. В частности, отсутствие такой информации обусловливает в ряде случаев экологически безграмотные действия обладателей горящих отходов – например, тушение угольных терриконов морской водой, сопровождающееся выбросами хлорных и других вредных соединений.

Инновационная технология глубокой и полной переработки *зольных уносов* угольных ТЭС, разработанная в ОИВТ при поддержке Президиума РАН (2008–2010 гг.) и корпорации «ИнтерРАО ЕЭС» позволяет последовательно, после термообработки исходного материала, получать следующие продукты [21]: 1) магнитный железосодержащий концентрат (до 60 % Fe_2O_3), представленный микросферами многоцелевого, в том числе прецизионного использования; 2) флотационный углеродный концентрат («недожог»), подлежащий возврату в котлы ТЭС и позволяющий сократить расход угля до 20 %; 3) глиноземный концентрат (39–46 % Al_2O_3 и 26–36 % SiO_2), из которого получен товарный глинозем для выплавки алюминия; 4) белитовый шлам 2-х сортов – «цементный» и «керамический».

Сравнение средних содержаний микрокомпонентов в опробованных углях и ШЗО свидетельствует о о том, что максимальная – шестикратная их концентрация в отходах углесжигания характерна для Ge и Ga среди редких металлов и Ni, Co, Pb, Zn, Sn – цветных, а также бария; меньшая, в 4–2,5 раза, характерна для Ti, Mn, V, P, Sr, Mo, Cu и минимальная, в 1,5 раза для B, Zr, Nb, Sc, РЗМ [22].

К настоящему времени изучено распределение по блокам и фракциям технологической схемы особо ценных редких и цветных металлов с определением группы наиболее токсичных. Установлена концентрация галлия (до 60–90 г/т), превышающая в 2–3 раза его содержания в бокситах и нефелинах, служащих традиционным сырьем для его промышленного получения. Как известно, в шлакозольных отходах (ШЗО) обнаружено порядка 150 минералов-концентраторов фазообразующих Fe, Ti, Mn, Mg, Ca, Al, щелочных металлов, а также особо ценных и токсичных микрокомпонентов. Поэтому изучение минеральных ассоциаций, их химического состава и структуры на всех стадиях физического и химического обогащения ШЗО является обязательным условием выбора способов переработки этих и других техногенных образовании. В частности, отсутствие в пробах ШЗО кузнецкого угля, в отличие от экибастузского, растворимых алюминийсодержащих фаз обусловило необходимость модифицирования разработанной технологии переработки золы в направлениях получения новых технических и строительных материалов.

С этих позиций наибольший ресурсно-экологический интерес представляет организация систематического минералого-геохимического изучения бурых углей Подмосковного и Челябинского угольных бассейнов, а также отходов их обогащения и сжигания (ШЗО), которые максимально обогащены как глиноземом, так и ценными цветными, благородными и рассеянными редкими металлами.

Проблема отложения солей и других минеральных образований в нефтепромысловом и нефтеперерабатывающем оборудовании, согласно исследованиям С. С. Потапова [23], продолжает оставаться актуальной во всем мире. В США затраты на борьбу с солеотложениями в буровом оборудовании и промысловых трубопроводах превышают 1 млрд. долл. Общий список минералов, обнаруженных в нефтегазовом оборудовании, приближается к 70. При этом ведущая роль принадлежит карбонатным, сульфидным и гидрооксидным соединениям при меньшей распространенности хлорных и фторидных. Наряду с солями-концентраторами Ca, Fe, Mg, Al, Cu обнаруживаются сульфаты бария и стронция, группа щелочно-алюмосиликатных и алюмосиликатных минералов и др. Очевидно, что принятая в нефтепромысловой практике оценка процессов и последствий минералоотложения в оборудовании исключительно с техногеохимических позиций должна быть дополнена и техноминералогическими исследованиями – от нефтяного пласта, системы поддержания давления и продуктов коррозии до полиминеральных отложений, требующих как профилактики образования, так и удаления. Это направление в развитии технологической минералогии приобретает особое значение в связи с необходимостью создания в России технически совершенных систем добычи и переработки тяжелой вязкой нефти (ТВН) и сланцевого газа.

С изложенных позиций становится очевидной своевременность введения А. Е. Ферсманом понятия «минералогия техногенеза», значимость которого наиболее ярко была доказана Б. В. Чесноковым и С. С. Потаповым на Урале. К сожалению, пока подобные исследования так же как изучение и оценка складируемых техногенных ресурсов, не получили в нашей стране системного развития в связи с отсутствием необходимой финансовой поддержки со стороны бизнеса и власти.

Технологическая минералогия как междисциплинарный фактор повышения эффективности и экологизации производств

В настоящее время очевидна необходимость активизации и специализации технолого-минералогических исследований как в фундаментальных поисково-методических, так и прикладных прогнозно-оценочных направлениях. Прежде всего, это обусловлено актуализацией задач возрождения и развития в нашей стране производств редкометальной продукции за счет промышленного освоения новых объектов недропользования и создания горно-химико-металлургических кластеров полного технологического цикла, включая выпуск не только конечной металлопродукции, но и высокотехнологичных изделий с ее использованием. Такая организация кластерных производств соответствует концепции нового технологического этапа в мировой экономике и передовому зарубежному опыту создания «под одной крышей» горной добычи и глубокой переработки минерального сырья. Для России ускоренное решение проблемы редкометального импортозамещения, определяющего уровни экономической и национальной безопасности, имеет стратегически важное значение как для развития ОПК, так и высокотехнологичных гражданских отраслей промышленности.

Техногенные образования и их накопленные ресурсы требуют организации широких технолого-минералогических исследований [24] по специальным государственным программам на федеральном, региональном и предпринимательском уровнях в условиях частно-государственного партнерства в выполнении конкретных госзаказов и проектов. Тем самым будут решаться задачи повышения эффективности действующих производств ГПК, ХМК, ТЭК и снижения их негативного воздействия на среду обитания в целях «сбережения народа». С другой стороны, представляется целесообразным и своевременным усилить внимание и государственную поддержку опережающим фундаментальным исследованиям уровней и минеральных форм концентрации редких, благородных и особо ценных цветных металлов в нетрадиционных и альтернативных видах природного и техногенного сырья: в корах выветривания, углях и отходах углепотребления, горючих сланцах, тяжелой вязкой нефти, вулканогенных образованиях, гидрогеотермах, промышленных водных сбросах и гидрогеологических новообразованиях ГПК, ХМК, ТЭК и т. д.

С этих позиций основное внимание исследователей в технологической минералогии следует сосредоточить на таких отраслях промышленного производства как черная металлургия – Fe, Cr, Mn, Ti, V и благородные металлы, цветная металлургия Cu, Ni, Zn, Pb (Co, In, Re, Ge, Ga, Bi, Hg, As, Cd и благородные металлы) и Mo, W, Sn (Re, Ta, Sc и др.) и производства редких металлов: профильные собственно редкометальные и редкоземельные и сопутствующие (Li, Cs, Rb, Ta, Nb, Be, TR, Sr, Zr, Hf, Sc, Ga и др.) [5].

При этом в качестве альтернативы сокращению объемов минералогических исследований, их материально-технической базы и кадровых потерь в условиях «переходного периода» как в институтах РАН, так и других ведомств, включая МПР и экологии РФ, могут рассматриваться очевидные перспективы развития микроминералогии и наноминералогии, соответственно рекомендованные член-корреспондентами РАН К. А. Власовым и Н. П. Юшкиным [25]. В год экологии – 2017 обсуждение поставленных вопросов рекомендуется провести на расширенном очередном Российском семинаре по технологической минералогии и на Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы получения и применения РЗМ и РМ – 2017», запланированной ОАО «Институт Гинцветмет» на 21–22.06.2017 г. в г. Москве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивцев В. И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых. Записки Всесоюзн. минералог. общ-ва, вып. 4, 1982. С. 4–20.
2. Григорьев Д. П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знаний. В сб. Онтогения минералов и технологическая минералогия. – Киев: Наукова думка, 1988. С. 11–15.
3. Никифоров К. А., Ревнивцев В. И. Направленное превращение минералов. – Новосибирск: СО РАН, 1992. – с. 193.
4. Мелентьев Г. Б. Инновационная техноэкология и новые задачи технологической минералогии. В ж. Экология промышленного производства, 2009. Вып. 2. С. 40–51; вып. 3. С. 13–29.
5. Мелентьев Г. Б. Инновационный потенциал техногенных ресурсов России и роль технологической геохимии в их изучении и оценке перспектив комплексного промышленного использования. В сб. статей IX Российского семинара по технологической минералогии «Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений», 22–24 апреля 2014 г., Магнитогорск. – Петрозаводск: Институт геологии Кар НЦ, 2015. С. 8–30.
6. Юшко-Захарова О. Е. Формы нахождения элементов-примесей в сульфидных месторождениях. В кн. Рудная геохимия и геология магматогенных месторождений. – М: Наука, 1980. С. 101–107.
7. Викентьев И. В. Исследование форм нахождения золота в сульфидах. В сб. статей IX Росс. семинара по технологической минералогии, 22–24 апреля 2014 г., Магнитогорск. – Петрозаводск: Ин-т геологии КарНЦ РАН, 2014. С. 71–76.
8. Мелентьев Г. Б., Овчарова Е. С., Малинина Е. Н., Заболоцкий А. И. Ресурсно-технологические проблемы комплексного использования природного и техногенного медно-сульфидного сырья с получением попутной высоколиквидной продукции. В сб. Техногенные ресурсы и инновации в техноэкологии. Под ред. Е. М. Шелкова и Г. Б. Мелентьева. – М: ОИВТ РАН, 2008. С. 133–148.
9. Мелентьев Г. Б. Пирит – на вес золота. В ж. «Редкие Земли», № 2, 2014. С. 106–107.
10. Чернышов Н. М., Молотков С. П., Буковшин В. В. Развитие новой минерально-сырьевой базы цветных и благородных металлов Центральной зоны России в свете идей профессора М. Н. Годлевского. В ж. «Руды и металлы», № а5, 2002. С. 82–92.
11. Мелентьев Г. Б. Распределение золота и других особо ценных и токсичных микрокомпонентов в железорудном сырье Костомукши и продуктах его переработки. Материалы V Конгресса обогатителей стран СНГ. 23–25 марта, 2005 г., Москва. Том 1. – М.: МИСИС. С. 35–39.
12. Резниченко В. А., Шабалин Л. И. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология. – М: Наука, 1986. – С. 293.
13. Sintetic tantalite //Metallurg. Bull. № 5185. 1967. P. 30.
14. Мелентьев Г. Б., Давыдов Н. Ф. Перспективы развития пирохимической технологии и связанных с ней минералого-геохимических исследований. В межведомственном сб. «Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов» Под ред. член-корр. АН СССР Ревнивцева В. И. – Л: Механобр, 1985. С. 17–34.
15. Делицын Л. М., Мелентьев Г. Б., Толстов А. В., Магазина Л. А., Самонов А. Е. Технологические проблемы Томтора и их решение. В ж. «Редкие Земли», вып. 5, 2015. С. 164–179.
16. Мелентьев Г. Б., Самонов А. Е., Делицын Л. М., Ваньшин Ю. В., Зубков А. А. Современное состояние и перспективы утилизации, обезвреживания, комплексной переработки и использования фосфогипса. В сб. Материалы III Международной научной конференции «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов», 25–27 сентября 2007 г., Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, с. 117–120.
17. Самонов А. Е. Новые данные по минеральным формам редких металлов в фосфогипсовых отходах. ДАН, 2011, том 440, № 2. С. 234–237.
18. Абрамов А. М., Соболь Ю. Б., Галиева Ж. Н. и др. Исследование по разделению РЗК различного состава и происхождения с получением индивидуальных РЗЭ. Создание автоматизированной установки по разделению на базе каскада центробежных экстракторов. В сб. Материалы научн.-практич. конф. «Актуальные вопросы получения и применения РЗМ», Москва, 21 октября 2014 г. – М: ОАО «Гинцветмет», 2014. С. 134–137.
19. Мелентьев Г. Б., Ельчин Д. С., Попова А. Н., Каримова И. И., Стулов В. Г. Минеральные новообразования в техногенезе. Материалы межрегиональной юбилейной конференции ЮУр ГУ, ЧДУ, ОИВТ РАН

«Комплексное освоение и переработка техногенных образований с использованием инновационных технологий», 13–15 ноября 2013 г., г. Челябинск. – Челябинск, ЮУрГУ – ЧДУ – ОИВТ РАН. С. 135–141.

20. Чесноков Б. В., Баженова Л. Ф., Бушмакин А. Ф. и др. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского бассейна (сообщение второе). В сб. Новые данные по минералогии эндогенных месторождений Урала. – Свердловск: ИМин Уро РАН, 1991.

21. Делицын Л. М., Власов А. С., Мелентьев Г. Б., Рябов Ю. В., Сударева О. В. Угольная зола: отходы или сырье? В ж. Редкие Земли, № 2(5), 2015. С.

22. Мелентьев Г. Б., Малинина Е. Н., Самаев С. Б., Букарь В. П. Геохимическая индикация потенциальной ценности и экологичности поликомпонентного угольного и мазутного топлива тепловых электростанций (ТЭС). В ж. Экология промышленного производства, вып. 1, 2014. С. 60–70.

23. Потапов С. С. Минералогия солевых отложений в скважинах и другом нефтепромысловом оборудовании месторождений Западной Сибири. Автореферат дисс. канд. геол.-минер. наук. – Екатеринбург: УрО РАН, 1993 г. – с. 20.

24. Горбатова Е. А., Мелентьев Г. Б., Овчарова Е. С., Вдовина О. К., Емельяненко Е. А. Особо ценные и экологически лимитируемые компоненты в хвостах обогащения уральского меднорудного сырья. Материалы межрегиональной юбилейной конференции ЮУр ГУ, ОИВТ РАН «Комплексное освоение и переработка техногенных образований с использованием инновационных технологий», 13–15 ноября 2013 г., г. Челябинск: ЮУрГУ – ЧДУ – ОИВТ РАН. С. 44–56.

25. Юшкин Н. П. Наноминералогия: объекты функции, перспективы. Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. – СПб: Минерал. общ. при РАН, 1999. – с. 20.

МИКРОМИНЕРАЛОГИЯ ФОСФАТНО-НИОБИЕВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ БЕЛАЯ ЗИМА И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ

Делицын Л. М., Рябов Ю. В., Мелентьев Г. Б., Магазина Л. О., Вальяно Г. Е.

ОИВТ РАН, Москва

Белозиминское месторождение фосфатно-ниобиевых руд, включающее остаточные коры выветривания, после открытия более 60 лет назад и многолетнего изучения специалистами различных организаций [1, 2, 3 и др.] продолжает оставаться в нераспределенном фонде в качестве крупного промышленного источника ниобия (40 % от разведанных в стране запасов) и фосфора (26 млн. т P_2O_5 по категории А + Б + C_1 и 101 млн. т P_2O_5 по категории C_2). Объектом опытной эксплуатации месторождения стала остаточная кора выветривания содержаниями 0,5–1 % Nb_2O_5 и 12–14 % P_2O_5 при средней мощности продуктивной залежи 32 м (от 10–20 до 70–100 м). Преимуществом Белой Зимы перед другими месторождениями ниобиевого сырья является преобладающая форма концентраций ниобия в виде пирохлора, необходимого для производства ферониобия, и фосфора – в виде апатита, способного удовлетворить потребности юга Сибири в фосфатных удобрениях. Однако, эти преимущества оказались до сих пор нереализованными в промышленное производство из-за отсутствия приемлемой технологии обогащения охристой коры выветривания несмотря на многолетнюю работу Белозиминской ОПОФ с потерями в тонких шламах 15 % Nb_2O_5, 20 % P_2O_5 и 48 % железа.

Нерешенные технологические проблемы Белой Зимы и намеченного к промышленному освоению нового разведанного месторождения железорудно-алюмо-фосфатно-редкометалльного месторождения Томтор в Республике Саха-Якутия, не имеющего аналогов в нашей стране и в мире по суперкрупным запасам и высоким содержаниям редких земель, включая иттрий, а также ниобий и скандий, обусловили организацию и развитие в ОИВТ РАН исследований, направленных на совершенствование технологии обогащения коровых руд карбонатитов, включая принципиально новые пирохимические методы.

Затруднения в разработках технологии обогащения охристых руд месторождения Белая Зима связаны прежде всего с тем, что руды представлены тонкодисперсным материалом с большим количеством железо-марганцевых шламов, которые в виде тонких пленок, примазок, оболочек и рубашек покрывают поверхность всех ценных минералов. Кроме того, одни и те же компоненты входят в состав различных минералов. Работами научных специалистов ВИМС, ГИРЕДМЕТ, ИРГИРЕДМЕТ, ГИГХС в качестве основополагающей была определена магнитно – флотационная схема обогащения с предварительным обесшламливанием руды. Значительные потери ниобия, редких земель и фосфора при обогащении руды

были связаны с фракцией мельче 20 мкм (вторичными шламами), направляемыми в отвал. Выход тонкодисперсных шламов превышал 30 %. В этой связи сложилось устойчивое представление о том, что такие потери неизбежны.

Основными промышленными компонентами охристых белозиминских руд являются P_2O_5 и Fe_2O_3, а также Nb_2O_5 и TR_2O_3 (табл. 1). Другие компоненты: MnO, V_2O_5, ZnO, PbO, ZrO_2, TiO_2, Al_2O_3, MgO, CaO, SrO, BaO, Na_2O, K_2O самостоятельного значения не имеют.

Минеральный состав охристых руд месторождения Белая Зима представлен главными образом апатитом, пирохлором и гидрооксидами железа (гидрогетит), а также тонкозернистыми шламами, состоящими из апатита, гидрооксидов железа с примесью пироксенов, полевых шпатов и глинистых частиц. Именно шламы являются основным препятствием для получения апатитового и железосодержащего концентратов надлежащего качества. На данное обстоятельство указывали все исследователи, занимавшиеся проблемой переработки руд месторождения Белая Зима [1–6].

Таблица 1

Содержание основных и редких компонентов в рудах месторождения Белая Зима

Компоненты	Кальцитовая охра	Анкеритовая охра	Минералы-носители ценных компонентов руды
P_2O_5	10,9–20,8	11,6–18,8	Апатит (25–45 %), монацит
Fe_2O_3	18,8–23,8 (до 30 %)	26,5–38,4	Гидрогетит, оксиды и гидрооксиды железа и марганца (25–35 %), магнетит (6–10 %)
Nb_2O_5	0,5–1,5	0,5–1,3	Колумбит, пирохлор
TR_2O_3	0,3–0,9	0,3–0,9	Монацит, апатит

На основании анализа результатов работ предшествующих исследователей нами за базовую схему обогащения принята магнито-флотационная схема, с тем отличием, что из нее исключена операция предварительного обесшламливания руды (рис. 1). Данная технология подробно рассмотрена в [4, 5] поэтому вопросы, связанные с переработкой магнетитового и апатитового концентратов в данной статье не рассматриваются.

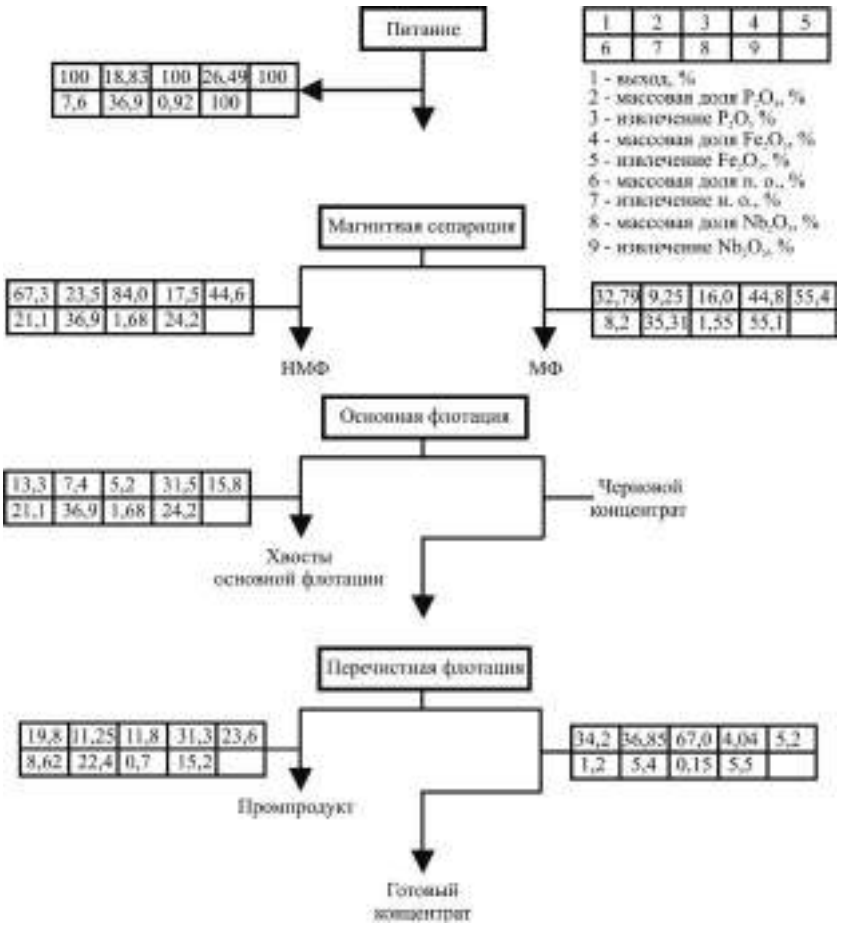


Рис. 1. Технологическая схема обогащения руды месторождения Белая Зима: МФ-магнитная фракция, НМФ-немагнитная фракция

Обогатительная схема дополнена нами стадией пирохимической переработки (ликвационной плавкой) отходов обогащения. При этом основными продуктами обогащения должны быть апатитовый и железосодержащий концентраты. Продукты, получаемые за счет пирохимической технологии, будут рассмотрены отдельно.

Минеральный состав руды и продуктов обогащения показал, что они состоят из одних и тех же минералов, но в различных количественных соотношениях (табл. 2). Химический состав минералов содержащихся в исходной руде, концентратах, немагнитной фракции и продуктах ликвационной плавки (силикатный расплав, фосфатно-солевой расплав) были определены на микрозонде.

Микроминералогия коровых руд и продуктов обогащения по данным микрозондового анализа

Главную сложность при обогащении представляют текстурно-структурные особенности руды (рис. 2).

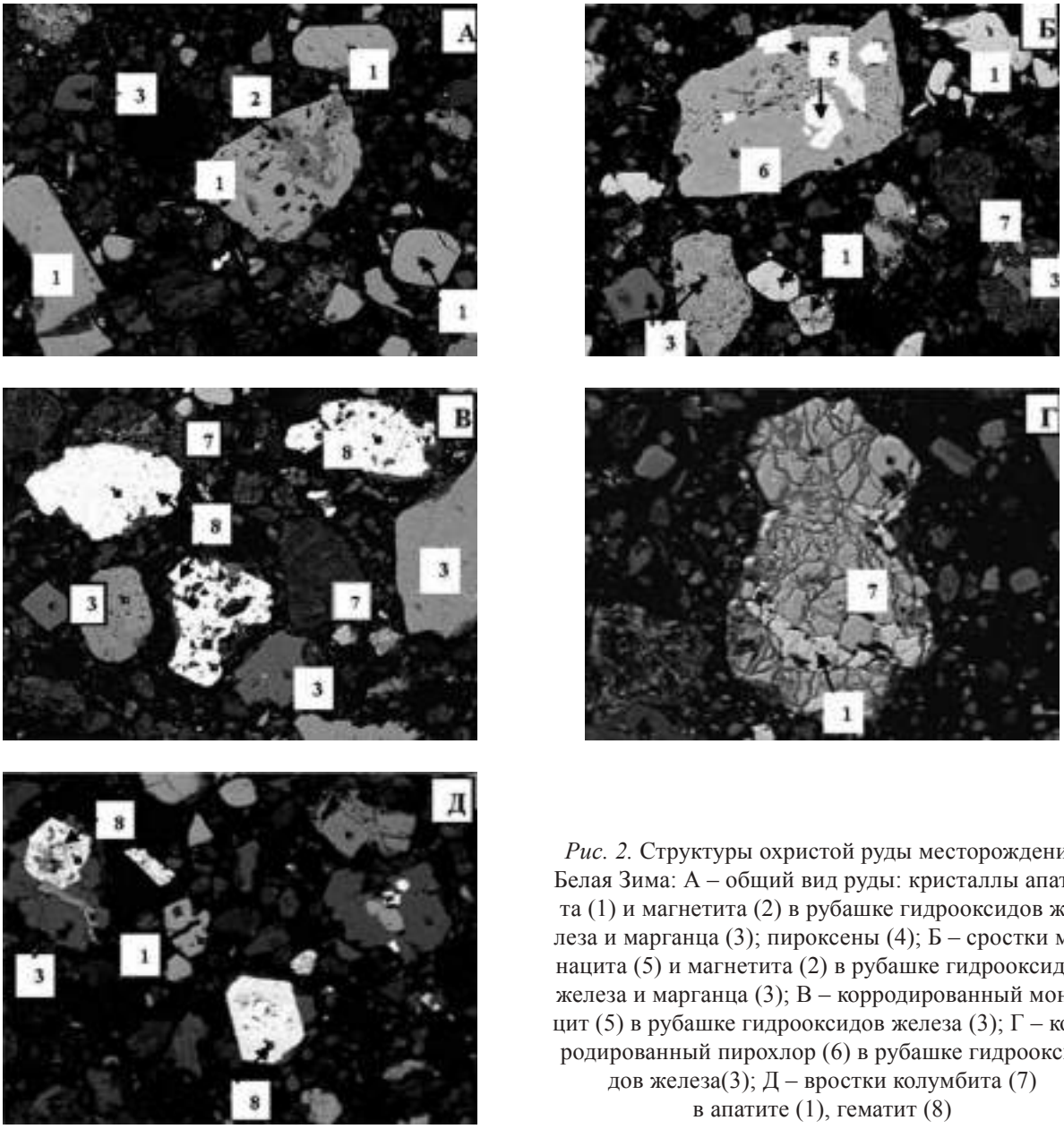


Рис. 2. Структуры охристой руды месторождения Белая Зима: А – общий вид руды: кристаллы апатита (1) и магнетита (2) в рубашке гидрооксидов железа и марганца (3); пироксены (4); Б – сростки монацита (5) и магнетита (2) в рубашке гидрооксидов железа и марганца (3); В – корродированный монацит (5) в рубашке гидрооксидов железа (3); Г – корродированный пирохлор (6) в рубашке гидрооксидов железа(3); Д – вростки колумбита (7) в апатите (1), гематит (8)

Все минералы руды представлены разного размера обломками, находящимися в оболочке гидрооксидов железа и марганца. Хорошо видно (рис. 2А), что обломки кристалликов апатита (1) и магнетита (2) находятся в тонкозернистой оболочке гидрооксидов железа (3). Тонкозернистые кристаллики различных минералов погружены в еще более тонкозернистую массу, которая состо-

ит из смеси апатита, магнетита, гидрооксидов железа и других минералов. Часто наблюдаются плотные сгустки железосодержащих шламов овальной формы, внутри которых находятся кристаллики апатита, магнетита и др. Показательно присутствие сростков монацита (5) с магнетитом (2) в оболочке гидрооксидов железа и марганца (3) (рис. 2Б). Ширина оболочки непостоянная и составляет 10–90 мкм. На рис. 2 В видно, что очень сильно измененные скопления монацита (5) размером 280–460 мкм находятся в окружении агрегатов гидрогетита (3) игольчатой формы. Сильно измененные кристаллы колумбита (6) находятся в рубашке гидрооксидов железа и марганца (3) (рис. 2Г), ширина же рубашки непостоянна и составляет от 5 до 50 мкм, а содержание в ней Fe_2O_3 в разных точках различается более, чем в 3 раза, хотя расстояние между анализированными точками составило 50–70 мкм. Также и содержания других компонентов (MnO, P_2O_5, SiO_2, MgO и др.) отличаются в 2–5 раз. В монокристалле апатита обнаружены включения колумбита (7) размером 80–110 мкм относительно правильной ромбоэдрической формы (1) (рис. 2Д). Контуры апатита неправильные, изломанные, а по периметру на нем находятся тонкие примазки гидрооксидов железа.

Структура гидрооксидных шламов железа марганца неоднородная, слагающие их минералы могут иметь пластинчатую, изометричную, остроугольную, игольчатую и более сложную форму. Шламы могут быть как кристаллическими, так и аморфными. Химический и минеральный состав шламов очень переменчивый и может изменяться в пределах оболочек в несколько раз при расстоянии между анализируемыми точками в десятки микрон.

Таблица 2

Минеральный состав (% масс.) пробы охристой руды и продуктов ее обогащения

Минералы	Руда	Магнитный концентрат	Немагнитная фракция	Апатитовый концентрат	Хвосты основной флотации	Пром-продукт
Апатит	46,0	22,7	57,6	90,2–94,0	18,0	27,6
Гидрооксиды железа и марганца	25–35	40–50	18–20	4–5	15–17	23–25
Магнетит	5–8	12–15	сл. – 1,0	Не обн.	сл. – 1,0	сл. – 1,0
Ниобаты: колумбит и пирохлор	0,7–1,3	1,5–2,0	2,2–2,4	0,15–0,21	1,5–1,8	0,65–0,70
Монацит	0,35–0,70	< 0,1	< 0,1	0,6–0,7	0,5	0,5
Силикаты: пироксен, полевой шпат, гидрослюды, глинистые и др.	8–10	8–10	20–25	1,5–2,0	20–25	8–10
Шламы (кл. < 5 мкм)	20–25	18–20	25–26	< 5	35–45	35–45

Гранулометрическая характеристика руды измельченной до 150 мкм и получаемых из нее продуктов обогащения, приведены в табл. 3 и 4. Высокое значение коэффициента вариации свидетельствует о неустойчивости гранулометрического состава руды и продуктов ее обогащения. Для всех продуктов медиана смещена в область значений меньших (~ на 25 %), чем среднее арифметическое диаметра частичек минералов. Получение из такой руды апатитового и магнетитового концентратов представляет значительные технологические трудности.

Немагнитная фракция, обогащенная апатитом, направляется на флотацию апатита, По сравнению с исходной рудой и магнитным концентратом она отличается меньшей величиной среднего диаметра частиц и меньшим значением медианы, т. е. в нее переходят наиболее тонкие классы минералов (табл. 3).

Таблица 3

Статистические параметры гранулометрического состава руды, магнитного концентрата и немагнитной фракции

Образцы	Статистические параметры				
	X, % мас.	S, % мас.	V, % отн.	Mo, % мас.	Me, % мас.
Исходная руда	24,0	23,9	99,3	31,0	18,0
Магнитный концентрат	23,4	21,2	90,7	27,1	18,4
Немагнитная фракция	21,6	22,8	105,8	27,9	14,4

X – среднее арифметическое, % масс.; S –среднее квадратичное отклонение, % масс.; V – коэффициент вариации, % отн.; Mo – мода, % масс.; Me – медиана, % масс.

Таблица 4

Фракционный состав руды, магнитного концентрата и немагнитной фракции (выход, % масс.)

Образцы	Классы крупности, мкм					
	< 5	5–18	18–40	40–50	60–70	70–105
Исходная руда	20,7	29,3	31,1	7,3	6,6	4,0
Магнитный концентрат	20,0	30,0	32,3	7,5	5,7	4,2
Немагнитная фракция	25,0	25,0	28,5	6,2	5,8	4,0

Магнитный концентрат, основными минералами которого являются магнетит (1) и апатит (3), характеризуется тем, что магнетит и апатит находятся, как правило, в свободной от тонкозернистых оболочек гидрооксидов железа форме (рис. 3 А). В концентрате находятся сростки ильменита (2) с магнетитом (1) (рис. 3 А), сростки пирохлора (5) с гидрогетитом (6) (рис. 3 Б), корродированные зерна колумбита (8) в рубашке гидрооксидов железа (7) (рис. 3 В), реликты магнетита (1) в гидрооксиде железа (7) (рис. 3 Г), сростки апатита (3) с колумбитом (8) и магнетитом (1) (рис. 3 Д). В магнитном концентрате гидрооксиды железа (7) образуют сгустки размером 5–150 мкм, внутри которых находятся мелкие зерна кристаллов апатита (3) (рис. 2 Б). В магнитный концентрат извлекается 16 % апатита, тогда как 84 % апатита остается в немагнитной фракции, которая направляется на флотацию апатита.

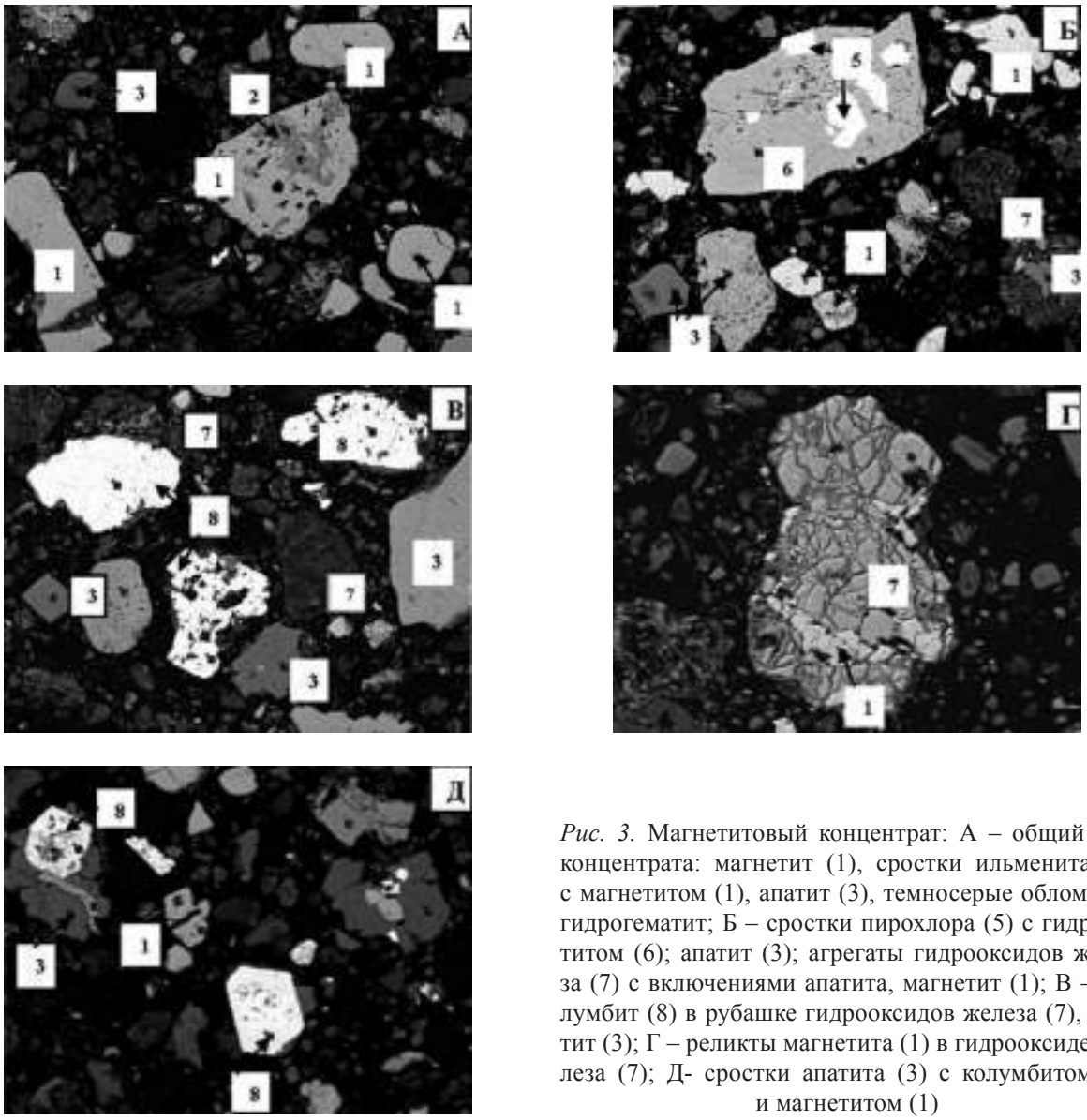


Рис. 3. Магнетитовый концентрат: А – общий вид концентрата: магнетит (1), сростки ильменита (2) с магнетитом (1), апатит (3), темносерые обломки – гидрогематит; Б – сростки пирохлора (5) с гидрогетитом (6); апатит (3); агрегаты гидрооксидов железа (7) с включениями апатита, магнетит (1); В – колумбит (8) в рубашке гидрооксидов железа (7), апатит (3); Г – реликты магнетита (1) в гидрооксиде железа (7); Д- сростки апатита (3) с колумбитом (6) и магнетитом (1)

Содержание железа и примесей Ti и V в магнетите из руды и магнитного концентрата довольно близки, отклонения от среднего арифметического небольшие (табл. 5). Присутствующий в виде вростков в магнетите ильменит имеет почти стехиометрический состав.

Таблица 5

Содержание компонентов (% масс.) в магнетите и ильмените

Компоненты	Магнетит			Ильменит
	Исходная руда (n=3)	Магнитный концентрат (n=4)		Магнитный концентрат (n=1)
		X	S	
V_2O_5	0,63	0,65	0,40	
TiO_2	2,05	1,08	0,28	67,98
Fe_2O_3 общ.	97,68	93,93	0,65	30,86

Примечание: X – среднее арифметическое, % масс.; S – стандартное отклонение, % масс.; n – число анализированных точек

В отличие от магнетита гидрооксиды железа и марганца отличаются большой изменчивостью химического и минерального состава (табл. 6), что отражается в большой величине коэффициента вариации компонентов.

Таблица 6

Содержание компонентов (% масс.) в агрегатах гидрооксидов железа и марганца в исходной руде и продуктах ее обогащения

Компоненты	Исходная руда (n=11)			Магнитный концентрат (n=1)	Немагнитная фракция (n=5)		
	X	S	V	X	X	S	V
P_2O_5	2,25	0,80	35,5	1,17	2,26	1,46	64,6
SiO_2	3,63	2,78	76,5	11,70	2,72 *	1,80	66,1
Al_2O_3	3,66	2,62	71,6	7,36	12,20	4,02	33,0
Fe_2O_3 общ.	37,10	15,63	42,1	17,8	48,92	17,14	35,0
Ce_2O_3	2,07 (n=1)	–	–	–	–	–	–
CaO	1,05	0,61	58,1	0,86	1,22	0,48	39,3
MgO	1,48 (n=2)	–	–	2,74	3,40	1,96	57,6
BaO	3,05±2,2	–	–	–	–	–	–
ZnO	1,32 (n=1)	–	–	–	0,73	0,16	21,9
PbO	1,35 (n=1)	–	–	–	–	–	–
MnO	6,90 **	4,68	67,8	2,27	5,08	3,90	76,8
K_2O	–	–		0,36	1,2 (n=1)	–	–

Примечание: X – среднее арифметическое, S – стандартное отклонение, V – коэффициент вариации; n – число анализированных точек; * содержание SiO_2 в отдельных точках немагнитной фракции достигает 42,2 %; ** содержание MnO в отдельных точках руды достигает 48,18 %;

Немагнитная фракция (хвосты магнитной сепарации) отличается тем, что в ней почти нет магнетита и она состоит главным образом из гидрогетита, апатита, мелких зерен пирохлора (1) и монацита (2) (рис. 4 А). В тонкозернистых агрегатах гидрооксидов железа присутствуют мелкие включения апатита (3) размером 1–10 мкм (рис. 4 Б). При этом контуры кристалликов апатита, иногда достигающие размеров 150–230 мкм, извилистые, неровные, но почти без примазок гидрооксидов железа. Во фракции встречаются сростки колумбита с апатитом (рис. 4 В), монацит (2) без примазок гидрооксидов железа и шламы алюмосиликатного состава (6), состоящие из пироксенов, полевых шпатов, гидрослюд, глинистых частичек (рис. 4 Г).

Ниобаты распределяются таким образом, что 31 % ниобия извлекается в магнитный концентрат, а 69 % остается в немагнитной фракции. При таком распределении ниобия он должен накапливаться в процессе флотации апатита в

промпродуктах и хвостах апатитовой флотации. Количество промпродуктов и хвостов флотации апатита довольно значительное – 22–25 % и чтобы исключить потери фосфора, железа и ниобия они перерабатываются в конечные продукты методом ликвационной плавки.

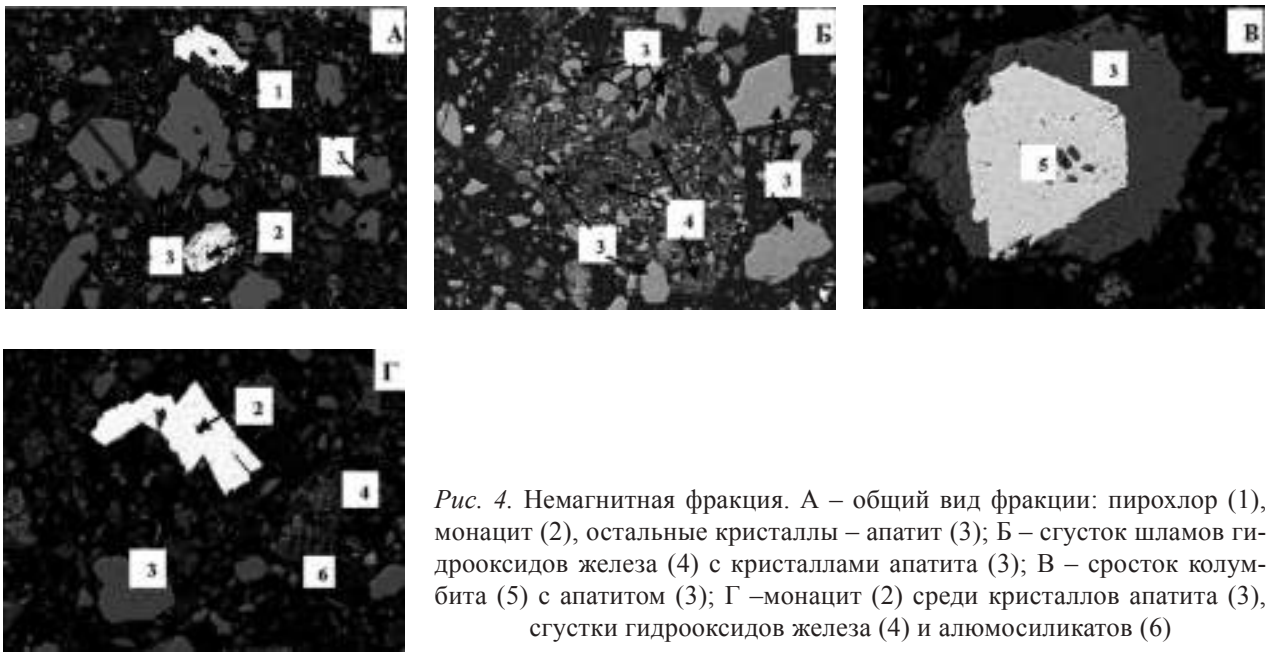


Рис. 4. Немагнитная фракция. А – общий вид фракции: пирохлор (1), монацит (2), остальные кристаллы – апатит (3); Б – сгусток шламов гидрооксидов железа (4) с кристаллами апатита (3); В – сросток колумбита (5) с апатитом (3); Г –монацит (2) среди кристаллов апатита (3), сгустки гидрооксидов железа (4) и алюмосиликатов (6)

Апатитовый концентрат, полученный флотацией немагнитной фракции, состоит на 90–94 % из апатита, очень редких тонких примазок гидрооксидов железа (4–5 %), 2–3 % силикатов и небольшой примеси ниобатов. Форма кристаллов апатита обломочная, остроугольная, реже овальная, примазки по краям зерен апатита присутствуют редко, размер кристалликов обычно 1–40 мкм, но встречаются и более крупные кристаллы до 150–200 мкм (рис. 5 А). Монацит редок, форма зерен неправильная, размеры до 50–60 мкм, сростки апатита с монацитом не обнаружены. Чаще отмечаются сростки апатита (2) с пирохлором (рис. 5 Б, В) и колумбитом и (рис. 5 Г). Апатит самый устойчивый по составу минерал, о чем свидетельствует маленькая величина стандартного отклонения компонентов (табл. 7).

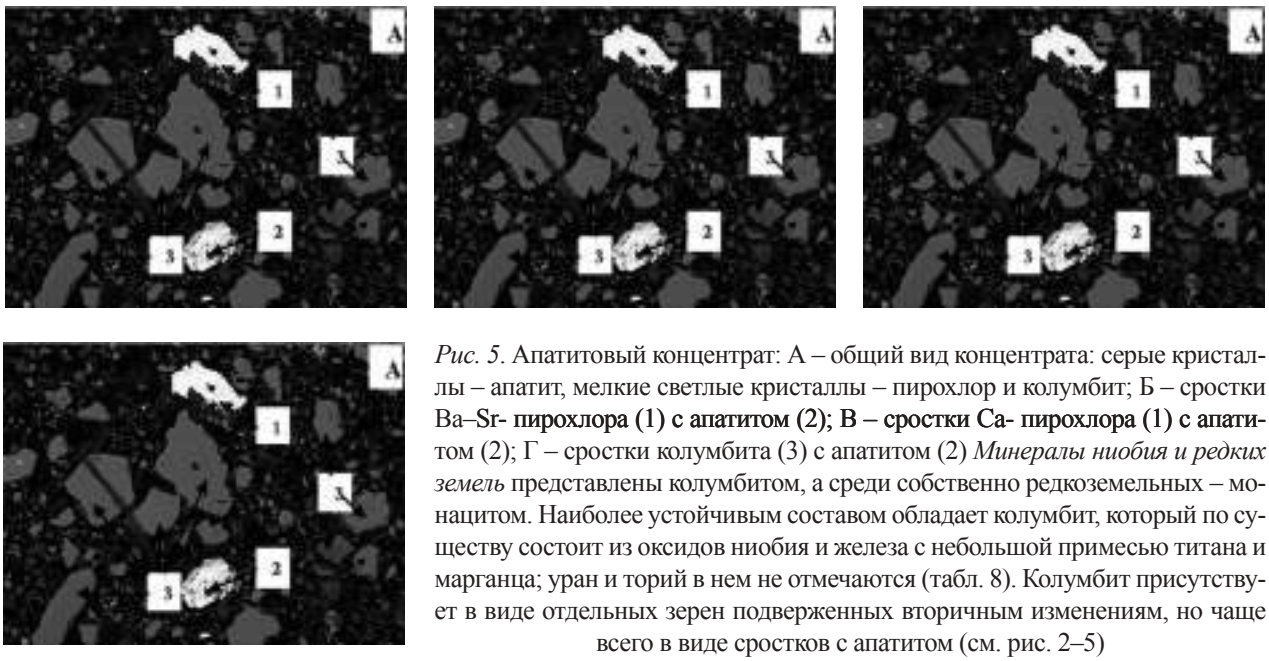


Рис. 5. Апатитовый концентрат: А – общий вид концентрата: серые кристаллы – апатит, мелкие светлые кристаллы – пирохлор и колумбит; Б – сростки Ba–Sr- пирохлора (1) с апатитом (2); В – сростки Ca- пирохлора (1) с апатитом (2); Г – сростки колумбита (3) с апатитом (2) *Минералы ниобия и редких земель* представлены колумбитом, а среди собственно редкоземельных – монацитом. Наиболее устойчивым составом обладает колумбит, который по существу состоит из оксидов ниобия и железа с небольшой примесью титана и марганца; уран и торий в нем не отмечаются (табл. 8). Колумбит присутствует в виде отдельных зерен подверженных вторичным изменениям, но чаще всего в виде сростков с апатитом (см. рис. 2–5)

Таблица 7

Содержание компонентов (% масс.) в апатите из руды и продуктах ее обогащения

Компоненты	Исходная руда (n=8)		Магнитный концентрат (n=6)		Немагнитная фракция (n=6)		Апатитовый концентрат (n=3)	
	X	S	X	S	X	S	X	S
P_2O_5	40,95	0,85	41,14	0,91	41,5	1,00	41,25	1,02
Fe_2O_3	–	–	0,69	0,19	0,47±0,10			
Ce_2O_3	1,06 (n=1)		0,70 (n=2)		0,37	0,11	–	–
Pr_2O_3	0,37 (n=1)		–	–	–	–	–	–
CaO	54,63	1,21	54,16	1,26	53,88	1,15	56,31	1,45
SrO	–	–	1,70	0,54	0,98	0,44	–	–
F	4,06	0,57	2,75	0,41	3,80	0,96	2,89	0,51

Примечание: X – среднее арифметическое, % масс.; S – стандартное отклонение, % масс.; n – число анализированных точек

Таблица 8

Содержание компонентов (% масс.) в колумбите из руды и продуктов ее обогащения

Компоненты	Исходная руда (n=4)		Магнитный концентрат (n=3)		Немагнитная фракция (n=3)		Апатитовый концентрат (n=2)
	X	S/V	X	S/V	X	S/V	
Nb_2O_5	75,95	0,85/1,1	70,26	9,60/13,7	74,73	1,66/2,2	73,5±3,81
V_2O_5	–	–	–	–	2,86 (n=1)		
TiO_2	2,95	0,57/19,3	1,96	0,71/36,2	4,16	1,72/41,3	4,44±2,76
Fe_2O_3	19,24	1,42/7,4	23,59	6,98/29,6	17,20	1,57/9,1	20,90±0,27
CaO	–	–	–	–	3,17 (n=1)		–
MnO	–	–	1,75 ± 0,11		1,37	0,90/65,7	1,16±0,51

Примечание: X – среднее арифметическое, % масс.; S – стандартное отклонение, % масс.; V – коэффициент вариации,, % отн.; n – число анализированных точек

Пирохлор по сравнению с колумбитом характеризуется большим разнообразием компонентов в своем составе (табл. 9). Следует обратить внимание на высокие содержания ThO_2 (до 14,6 %), UO_2 (до 4,7 %), CaO, SrO, BaO. В небольшом количестве в пирохлоре присутствуют Na_2O, MnO, TR_2O_3, V_2O_5, P_2O_5,TiO_2, Fe_2O_3. В одном из образцов отмечено высокое содержание Ta_2O_5, равное 6,48 %. Коэффициенты вариации для Nb_2O_5, TiO_2, Fe_2O_3, CaO и SrO высокие и свидетельствуют о том, что пирохлор был подвержен значительным изменениям в период формирования рудной залежи.

Монацит характеризуется большими колебаниями содержания редких земель и фосфора в своем составе (табл. 10). Кроме того, в нем присутствует до 2,0–2,43 % масс. ThO_2.

Таблица 9

Химический состав (% масс.) пирохлора из руды и продуктов ее обогащения

Компоненты	Исходная руда (n=1)	Магнитный концентрат (n=4)		Немагнитная фракция (n=3)		Апатитовый концентрат (n=4)	
		X	S/V	X	S/V	X	S/V
Ta_2O_5	–	6,48 (n=1)		–	–	–	–
Nb_2O_5	78,17	65,14	6,50/10,8	69,30	6,08/8,8	74,47	3,57/4,8
V_2O_5	–	1,98 (n=2)		–	–	–	–
SiO_2	–	1,66 (n=2)		2,81 (n=2)		1,95 (n=1)	
TiO_2	–	4,12	1,89/45,8	2,73	1,24/45,4	2,75	0,28/10,2
ThO_2	–	1,58 (n=1)		14,60 (n=1)		–	–
UO_2	–	2,38±2,30		–	–	–	–
Fe_2O_3 общ.	1,81	7,90	6,34/80,0	6,06	8,26/136,3	1,06	0,33/31,1
La_2O_3	–	–	–	–	–	1,30 (n=1)	
Ce_2O_3	–	1,46 (n=1)		1,83±0,38		3,23 (n=1)	
Eu_2O_3	–	0,58 (n=1)					
CaO	2,54	8,08	2,80/34,6	7,74	6,25/80,7	10,93	6,85/62,7
SrO	8,07	7,00±0,50		–	–	6,02	2,18/36,2
BaO	7,79	–		–	–	7,33 (n=1)	
MnO	–	1,37 (n=1)		–	–	–	–
Na_2O	–	2,60±1,34		–	–	–	–

Примечание: X – среднее арифметическое, % масс.; S – стандартное отклонение, % масс.; V – коэффициент вариации, % отн.; n – число анализированных точек.

Таблица 10

Химический состав (% масс.) монацита из руды и продуктов ее обогащения

Компоненты	Исходная руда (n=8)		Магнитный концентрат (n=1)	Немагнитная фракция (n=1)	Апатитовый концентрат (n=1)
	X	S/V			
P_2O_5	26,73	6,52/24,4	30,35	29,70	31,11
ThO_2	2,00 (n=3)		–	2,43	–
Fe_2O_3	2,38 (n=3)		–	–	–
La_2O_3	17,20	6,90/49,1	21,63	18,70	16,41
Ce_2O_3	27,95	6,42/23,0	36,55	32,80	35,76
Pr_2O_3	2,65	0,84/31,7	2,91	2,41	3,43
Nd_2O_3	7,35	3,65/49,5	10,37	10,70	15,22
Sm_2O_3	0,82 (n=2)		1,07	0,89	1,82
Eu_2O_3	–		–	1,10	–
Gd_2O_3	–		–	1,00	–
CaO	8,01 (n=2)		–	–	–
F	1,15 (n=3)		–	–	–

Примечание: X – среднее арифметическое, % масс.; S – стандартное отклонение, % масс.; V – коэффициент вариации, % отн.; n – число анализированных точек

Вышеприведенные данные свидетельствуют о том, что хвосты флотации и промпродукты, образующиеся при флотации апатита, представляют собой довольно значительный резерв для дополнительного извлечения фосфора и ниобия. Существующими методами обогащения выделить из них апатитовый и ниобиевый концентраты не представляется возможным о чем свидетельствуют все ранее выполненные исследования. В этой связи в целях исключения потерь фосфора и ниобия, неизбежных в обычных технологических схемах, для их извлечения был использован разработанный авторами метод ликвационной плавки [2, 4].

Микроминералогия продуктов ликвационной плавки

Из отходов обогащения готовится шихта с добавкой фторида натрия, которая усредняется, гранулируется и подвергается ликвационной плавке. Технология ликвационной плавки редкометального сырья охристых руд месторождений коры выветривания рассмотрена в [4]. В процессе ликвации образуются два несмешивающихся расплава: фосфатно-солевой и силикатный (рис. 6).

Оба расплава представляют собой искусственное сырье, отличающееся по составу и свойствам. В результате химических реакций, протекающих в расплавах, образуются новые фазы, которые в исходном сырье отсутствуют.

Силикатный расплав после закалки представлен силикатным стеклом (матрица), в структуре которого находятся пластинчатые кристаллы гематита (Г) размером от 1–2 х 5–7 мкм до 10–12 х 15–18 мкм и мельчайшие капельки фосфатно-солевого расплава (рис. 7) диаметром < 1–2 мкм. Состав силикатного стекла, гематита и фосфатно-солевых шариков приведен в табл. 11. Что касается состава фосфатно-солевых шариков (сделано 2 анализа), то следует отметить, что в связи с их малыми размерами при анализе на микрозонде происходит захват материала матрицы. Соответственно их состав является приближенным. В состав матрицы также могут попадать компоненты фосфатно-солевых шариков.

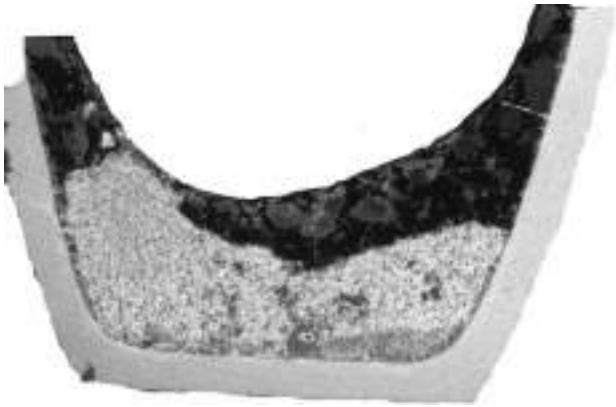


Рис. 6. Ликвация расплавов при плавке промпродуктов флотации апатита: верхний слой – силикатный расплав, нижний слой – фосфатно-солевой расплав

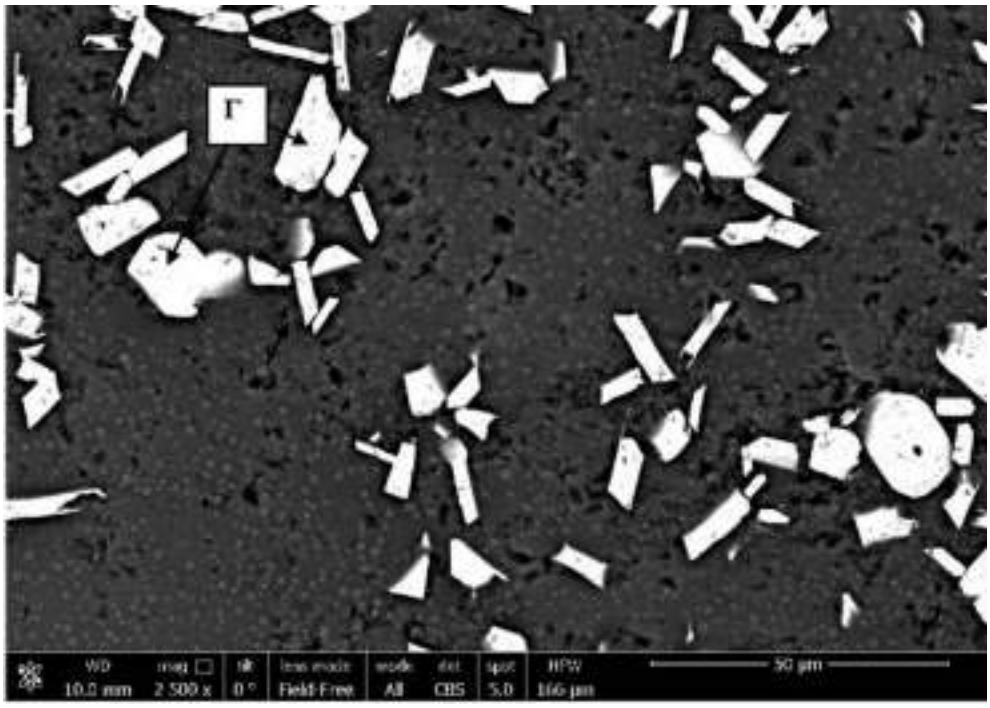


Рис. 7. Структура силикатного расплава. Силикатное стекло с кристаллами гематита (Г) и мелкими шариками фосфатно-солевого расплава

Таблица 11

Состав фаз, находящихся в структуре силикатного стекла (содержание компонентов в атомных %)

Компоненты	Силикатное стекло	Гематит	Фосфатно–солевые шарики	
			Анализ 1	Анализ 2
Nb	0,45	не обн.	0,41	не обн.
P	1,61	0,89	5,08	9,17
Si	29,66	6,41	19,35	13,22
Fe	17,19	61,00	–	–
Al	2,32	0,61	1,53	0,99
Ca	4,80	2,04	24,39	27,33
Mg	0,17	–	0,64	0,17
Mn	3,52	2,22	5,90	4,33
Na	6,81	4,39	2,04	3,73
F	1–2	–	16,16	15,17
O	29,98	19,98	21,95	22,93

Фосфатно-солевой расплав, структура которого приведена на рис. 8 и 9, обладает высокой кристаллизационной способностью и состоит из апатита, Ca-Na-F-фосфатов, фторидов, более сложных солевых компонентов и мелких шариков силикатного расплава.

На рис. 8 видно, что кристаллы апатита изометричной формы (1) размером 50x50 мкм и кристаллы Ca-Na-F-фосфатов (4) составляют основную часть фосфатно-солевого расплава, между которыми находятся обособления кристаллов фторида натрия (2) размером от 5x5 до 10x15 мкм и мелкие шарики или овальные обособления силикатных шариков (3) размером 10x15 мкм и меньше. Гематит закристаллизовался в виде тончайших волосовидных кристаллов (5). В структуре фосфатно-солевого расплава кроме того в небольшом количестве присутствуют мелкие фазы (6, 6а) размером от долей до 3x4 мкм, которые отсутствуют в руде и продуктах ее обогащения. Апатит кроме изометричных кристаллов кристаллизуется также в виде длиннопризматических кристаллов размером 30x450 мкм (рис. 9). Состав описанных образований приведен в табл. 12 и 13.

По данным анализа на микрозонде апатит представлен фтор – апатитом с примесью La, Ce, Sr, Na и Mn (табл. 12). Отношение Ca: P в апатите составило 2,09, что близко стехиометрическому соотношению данных компонентов = 2,14. Ca-Na-F-фосфаты имеют сложный переменный состав и содержат помимо Ca, Na, P и F довольно много Mn. Волосовидные кристаллы гематита по составу ничем не отличается от обычного гематита. В интерстициях фосфатов и фторида натрия присутствуют в очень малом количестве мелкие (< 1–3 мкм) кристаллики, отличающиеся высокими содержаниями Ba, La, Ce, Sr, Th и фтора, Nb и фтора, и фаза с высоким содержанием Zn и Cr и кислорода (табл. 13). Отмеченные микрофазы кристаллизовались из фосфатно-

солевого расплава после кристаллизации фосфатов. Их количество невелико, но после растворения фосфатов в растворе азотной кислоты они будут накапливаться в нерастворимом остатке и их возможно утилизировать гидрометаллургическими методами.

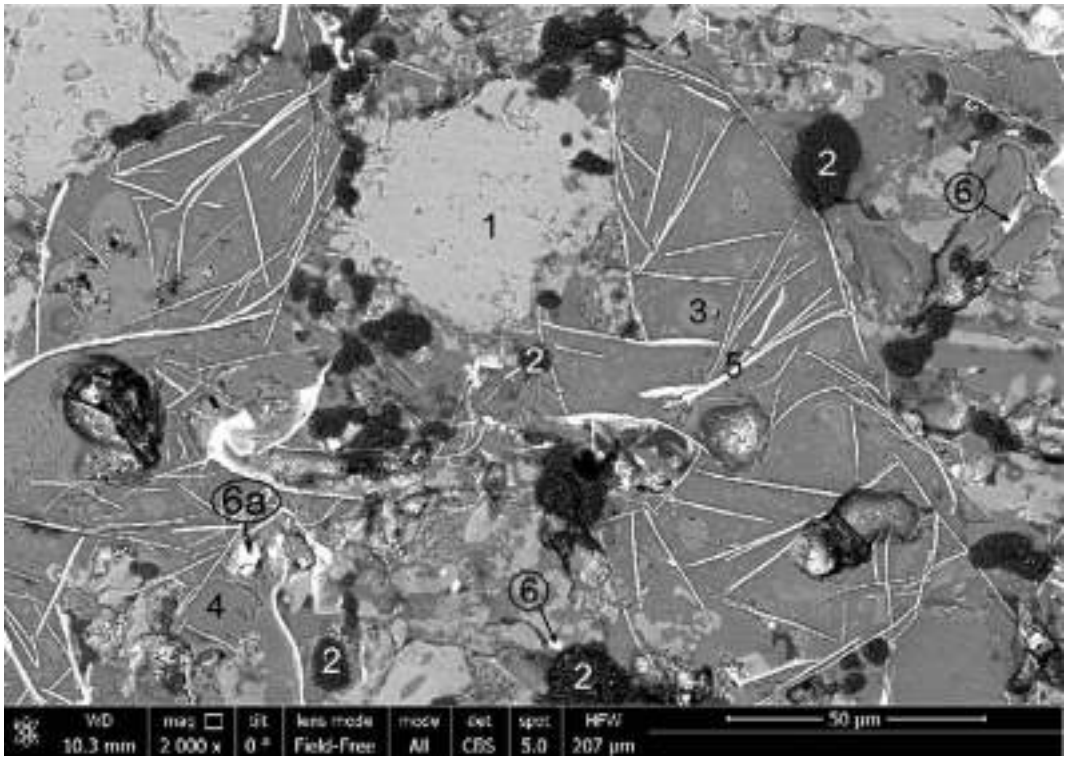


Рис. 8. Структура фосфатно-солевого расплава: кристаллы апатита (1), кристаллы Ca-Na-F-фторфосфата (4), кристаллы фторида натрия (2), капли-шарики силикатного расплава (3), волосовидные кристаллы гематита (5), фтор-соли (6), оксиды Zn, Cr (6а)

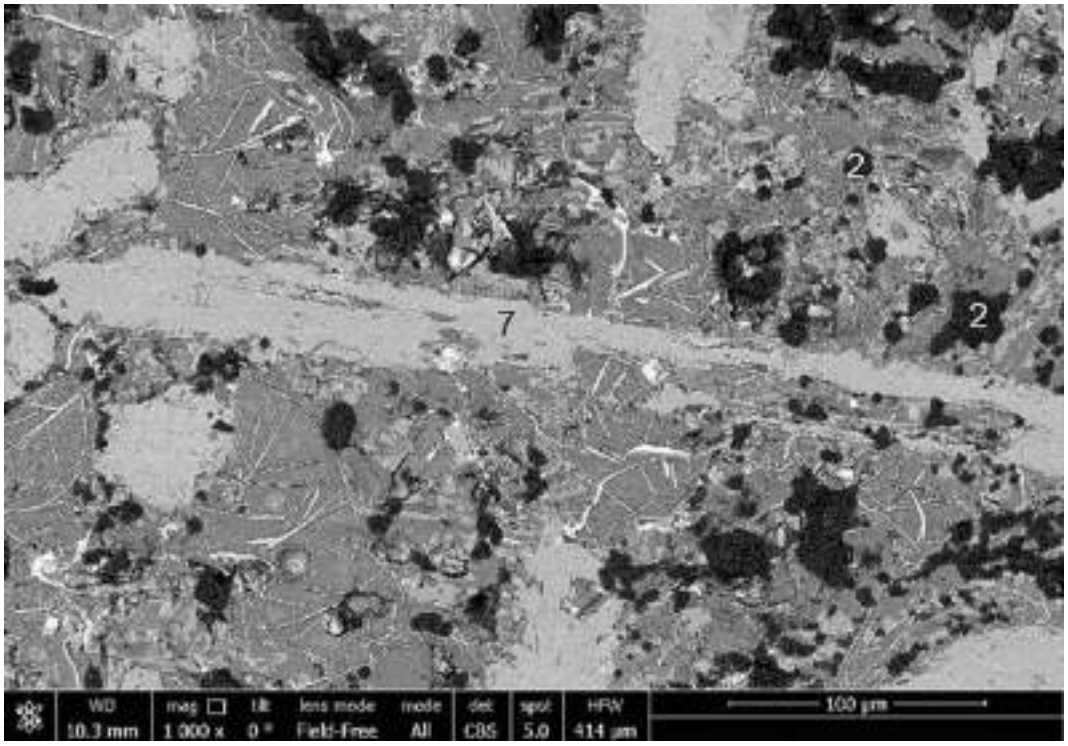


Рис. 9. Длиннопризматические кристаллы апатита в фосфатно-солевом расплаве (7), фторид натрия (2)

Таблица 12

Химический состав апатита, Ca-Na-F-фосфатов и фторида натрия (% масс.)

Компо–ненты	Апатит		Ca-Na-F-фосфаты		Фторид натрия	
	точка 1	точка 7	точка 4(1)	точка 4(2)	точка 2(1)	точка 2(2)
P	18,5	18,5	18,79	15,04	0,93	0,42
Ca	39,6	39,6	13,14	10,89	8,35	1,69
Sr	2,70	2,88	1,06	–	1,06	–
Na	0,57	0,76	22,18		45,88	53,44
F	2,52	2,35	9,77	5,61	39,37	41,38
Mn	1,16	0,44	13,31	10,96	–	–

Примечание: в составе апатита содержится 0,65–0,81 % La; 1,18–1,45 % Ce; содержание P и Ca в составе апатита рассчитано с учетом стехиометрического состава

Таблица 13

Химический состав микроминералов с высокими содержаниями Ba, La, Ce, Sr, Th, Nb, Zn и Cr (% масс.)

Компо-ненты	Фазы с высоким содержанием Ba, La, Ce, Sr, Th			Фазы с высоким содержанием Nb		Zn и Cr – содержащая фаза
	6(2)	6(3)	6(4)	6(1)	6(5)	6a
F	18,22	6,15	21,05	12,98	22,70	1,08
O	19,18	11,74	4,43	15,00	22,70	26,69
P	12,38	6,76	2,15	10,34	7,31	0,59
Na	18,14	10,22	4,21	15,94	11,44	–
Ca	7,84	10,54	7,22	15,09	8,72	1,55
Sr	2,17	2,59	4,05	1,31	–	–
Ba	7,70	18,21	36,64	–	–	–
La	1,86	5,30	7,26	–	–	–
Ce	2,41	6,12	8. 06	–	–	–
Th	–	2,47	1,73	–	–	–
Nb	–	–	–	10,86	28,12	–
Zn/Cr	–	–	–	–	–	38,56/11,43

Примечание: содержание Mn в точках 6 (2) и 6 (1) составило 3,77 и 6,86 % соответственно.

В заключение необходимо подчеркнуть, что обнаруженный в опытах обогащения охристых руд месторождения Белая Зима эффект очищения минеральных зерен от «рубашек» мельчайших частиц гидрооксидов железа и марганца, нарущающих эффективность обогащения, указывает путь дальнейшего совершенствования технологии обогащения подобных руд – проведение предварительного физического воздействия на измельченную руду с целью удаления «рубашек» с поверхности зерен и улучшения эффективности последующих обогатительных процессов. Переработка шламов и отходов обогащения способом ликвационной плавки позволяет свести практически к минимуму потери полезных компонентов руды. Такая комбинированная технология позволяет достичь максимального извлечения фосфора, железа, ниобия и редких земель.

Эти условия, по мнению авторов, учитывающие микроминералогическую специфику тонкодисперсного сырья, способны обеспечить положительное решение проблемы создания промышленных обогатительно-передельных технологий эффективного обогащения и глубокой переработки фосфатно-ниобиевых (Белая Зима), ниобиево-редкоземельных и фосфатно-ниобиево-железистых (Томтор) руд коры выветривания карбонатитов. Последними представлены не только глубокие горизонты мощностью в сотни метров центрального разведанного участка Буранный на Томторе, но и два разведуемых ныне фланговых участка – Северный и Южный. Кроме того, разведуются подобные обогащенные Fe и Mn фосфатно-редкоземельные руды месторождения Чуктукон.

В связи с изложенным рекомендуемое решение задач сочетанного использования методов традиционного обогащения с инновационными пиро- и гидрохимическими представляется заслуживающим своевременной поддержки со стороны РМО, геологоразведочных организаций, бизнеса и власти в целях обеспечения возможностей перехода от лабораторных исследований к пилотным и опытно-промышленным испытаниям для ускорения ввода в эксплуатацию рассматриваемых уникальных месторождений карбонатитовых формаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов А. А., Белов С. В. Комплексные карбонатитовые месторождения Зиминского рудного района (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений, т. 41, № 2, 1999. С. 109–130.

2. Мелентьев Г. Б., Делицын Л. М., Лебедева Г. Г. и др. Перспективы пирохимической переработки комплексного фосфатно-редкометального сырья // В сб. Редкие элементы в нетрадиционном сырье и перспективы их попутного производства. – М: ИМГРЭ Мингео и АН СССР, 1987. С. 18–31.

3. Лихнекевич Е. Г., Петрова Н. В., Михайлова Н. С. и др. Комплексная переработка ниобий-

редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом // Разведка и охрана недр, № 1, 1999. С. 42–43.

4. Делицын Л. М., Рябов Ю. В., Мелентьев Г. Б. От Белой Зимы к Томтору // Редкие Zемли. 2015. № 1 (4). С. 70–83.

5. Делицын Л. М., Мелентьев Г. Б., Толстов А. В., Магазина Л. О., Самонов А. Е. Технологические проблемы Томтора и их решение // Редкие Zемли. 2015. № 2(5). С. 164–179.

6. Мелентьев Г. Б. Продвижение Томтора // Редкие Zемли, № 3, 2014. С. 34–30.

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПИРОХЛОР-МОНАЦИТ-КРАНДАЛЛИТОВЫХ РУД ТОМТОРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Астахова Ю. М., Быстрова А. А., Быстров И. Г., Шувалова Ю. Н., Якушина О. А., Ружицкий В. В.

ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Томторское рудное поле приурочено к одноименному массиву ультраосновных щелочных пород и карбонатитов, расположено на северо-восточном склоне Анабарского кристаллического щита на севере Сибирской платформы. С корой выветривания и продуктами ее переотложения связаны уникально богатые руды редких металлов и редкоземельных элементов.

Руды отличаются полиминеральным составом, высокой дисперсностью минеральных составляющих и их тесными срастаниями. По текстурному рисунку они представлены материалом переменного состава плотного, массивного и полосчатого сложения. В целом текстура руд определяется проявлением различных по мощности и составу слоев. Наиболее распространенными текстурами являются волнисто-слоистые, микрослоистые, массивные. Микрослоистость обусловлена чередованием полос очень тонких по мощности алюмофосфатного, пирохлорового, монацитового, каолинитового и сидеритового составов.

К главным полезным компонентам руд относятся Nb_2O_5, REE_2O_3, Y_2O_3. Самостоятельной минеральной формой ниобия является пирохлор, в меньшей степени он входит в состав рутила. По содержанию ниобия руды можно отнести к бедным (менее 1 %) с высокими содержаниями кремнезема, железа. Концентраторами редких земель являются минералы группы крандаллита, монацит, апатит; бария и стронция – минералы группы крандаллита.

Руды сформированы полиминеральными агрегатами с переменным содержанием крандаллита и каолинита тонкозернистого строения. В цементе также присутствуют сидерит, гидроксиды железа, ильменорутил, анатаз, пирохлор и другие минералы (рис. 1). Чаще всего это агрегаты землистого строения, сложного и переменного состава.

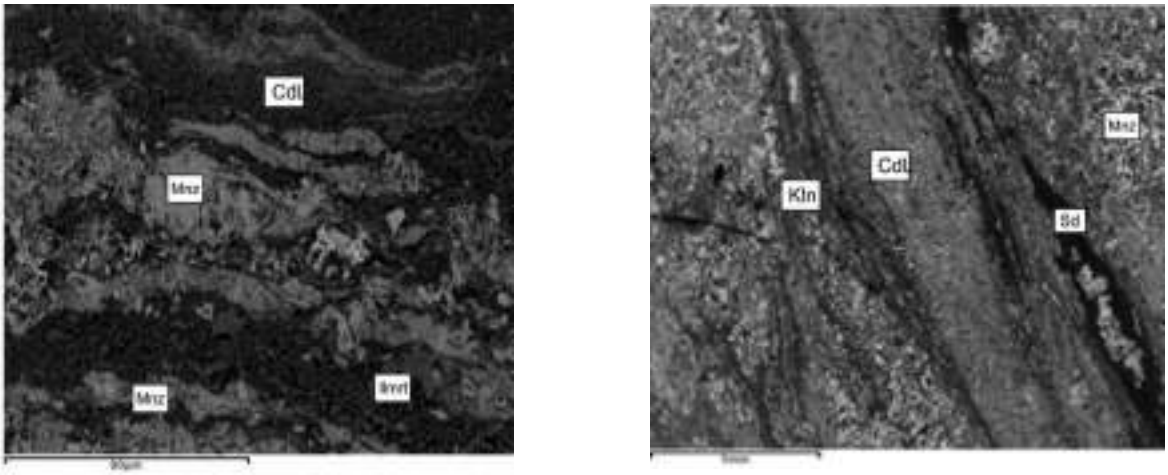
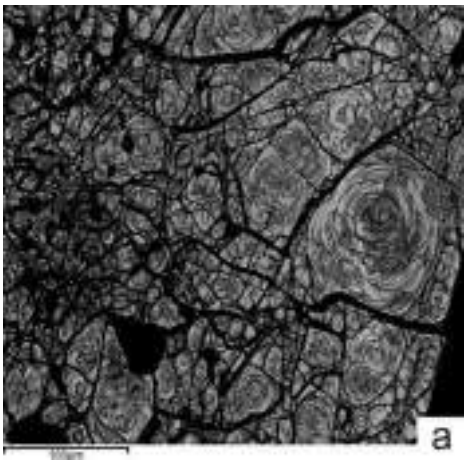


Рис. 1. Характер взаимоотношений рудных и нерудных минералов в рудах, изображение в обратно рассеянных электронах

Пирохлор образует отдельные кристаллы октаэдрического облика, обломки округлой и угловатой формы буровато-красного и белого цвета с перламутровым блеском, а также агрегаты мельчайших зерен размером от 1 мкм до 0,5 мм, в разной степени преобразованных гипергенными процессами. В породе распределен в виде вкраплений, образующих «сыпь» в цементирующей массе алюмофосфотов и силикатов. Главной особенностью гипергенного преобразования пирохлора является замещение Ca и Na на Sr, Ba и Pb. На основании этого можно сделать вывод, что в рудах значительно преобладают преобразованные разновидности минерала. Гипергенное преобразование пирохлоров сопровождалось текстурными преобразованиями: – характерна дезинтеграция крупных кристаллов на мелкие блоки (рис. 2). Часто микротрещины между индивидами выполнены минералами гр. крандаллита и апатитом, реже сульфидами.



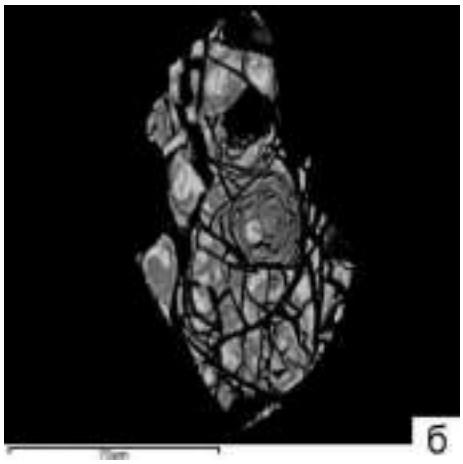
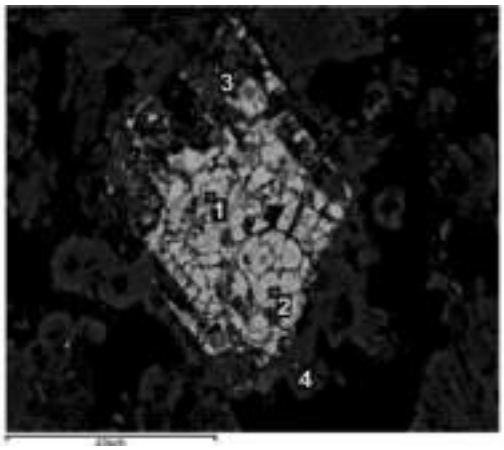


Рис. 2. Дезинтегрированные кристаллы пирохлора. а –участок Северный; б –участок Южный. Изображения в обратно рассеянных электронах

В природных условиях при микротектонических нарушениях в кристаллических выделениях пирохлора, вероятно, происходило переотложение вещества сложно-блокового строения, что в конечном итоге обуславливает морфоструктурную вторичную микронеоднородность его индивидов и микроагрегатов.

Для второго типа преобразований характерно выщелачивание центральных и краевых частей зерен пирохлора и замещение их минералами гр. крандаллита, монацитом и апатитом (рис. 3).

Минералы группы крандаллита формируют преимущественно полиминеральные агрегаты, в которых является доминирующими. Отмечается слабая индивидуализация отдельных зерен изометричной и округлой формы, тесно ассоциирующих с тонкодисперсным пирохлором, монацитом, гидроксидами железа, размер зерен которых нередко значительно меньше 5 мкм. По данным рентгеноспектрального микроанализа минерал имеет смешанный состав. По данным рентгенографического анализа по межплоскостным расстояниям надежно диагностируются горсейксит (2. 96, 3. 55, 5. 72 Å) и промежуточный член гойяцит-флоренсит (2,94, 3,53, 5,71 Å).



Пирохлор										
	Ca	*Na*	*Sr*	*Ba*	*Pb*	*Fe*	*Nb*	*Ti*	*Al*	*F*
1	2.37	1.96	11.53	4.29	0.00	0.28	42.98	2.22	0.14	3.62
2	1.77	1.93	10.89	6.34	0.89	0.21	44.48	1.98	0.14	3.18

Горсейксит						
	Al	*P*	*Ca*	*Fe*	*Sr*	*Ba*
3	15.06	12.23	1.26	0.61	3.61	16.34
4	13.99	11.30	0.79	0.73	2.51	14.51

Рис. 3. Замещение пирохлора тонкозернистым агрегатом крандаллита при выщелачивании краевых частей кристалла. Изображение в обратно рассеянных электронах. Состав минералов приведен по данным рентгеноспектрального микроанализа

Монацит представлен цериевой разновидностью, образует агрегаты в массе алюмофосфатов и силикатов в виде микропрожилков, линзовидных выделений. В процессе гипергенеза переходит в гидратированную разновидность, зерна приобретают спутано-волокнистый, скелетный облик. Такие агрегаты состоят из полых калиброванных трубочек длиной до 30 мкм и диаметром 15 мкм, в сферолитоподобных агрегатах монацита трубочки расходятся из общего центра в «скелетообразных» агрегатах они располагаются хаотично, что было выявлено и другими исследователями [Лазарева и др., 2015]. Толщина стенок у трубок различается, встречаются скопления трубок большой толщины, формирующие агрегаты, которые выглядят как сплошная масса (рис 3. б).

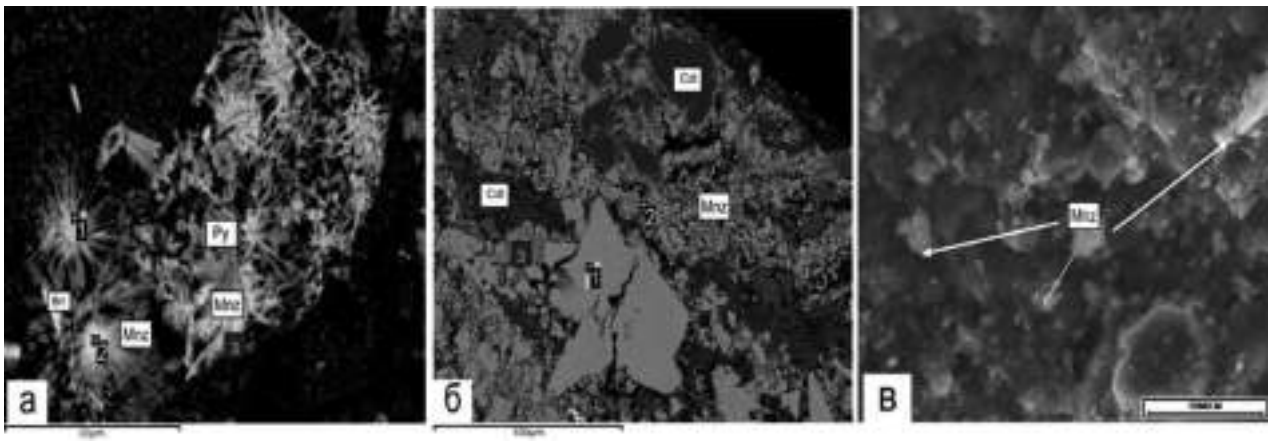


Рис. 4. Морфоструктурные особенности монацита. а. – спутано-волокнистые и сферолитовые агрегаты монацита; б. – обломки остроугольной формы в и колломорфные выделения (изображение в обратно рассеянных электронах, а – Северный уч., б- Южный уч.); в. – агрегаты монацита пластинчатой и глобулярной формы в тесной ассоциации с алюмофосфатами (РЭМ)

Минералы титана в руде представлены анатазом и рутилом. Встречаются в виде отдельных зерен и их скоплений неправильной формы размером до 0,2 мм в тесной ассоциации с алюмофосфатами, пирохлором и другими минералами Отличительной особенностью рутила является примесь ниобия. Титанаты четко идентифицируется по данным рентгенографического анализа по межплоскостным расстояниям: анатаз – 2,40; 2,34; 3,52 Å; рутил – 1,69; 3,24 Å. В них присутствуют кремнезем, алюминий, фосфор, кальций, марганец и хром, связанные с механическими примесями породообразующих минералов.

Главными породообразующими минералами являются слоистые алюмосиликаты, хлорит на долю которых приходится более 50 %, а также карбонаты. Кварц, полевой шпат, апатит присутствуют в подчиненном количестве.

Каолинит является главным породообразующим минералом руд, присутствует в тесной ассоциации с минералами группы крандаллита, слюдами, оксидами железа и другими минералами. Каолинит надежно определяется рентгенографическим анализом, особенности его строения изучены электронно-микроскопическим методом. Материал сформирован кристаллами каолинита пластинчатой, чешуйчатой формы размером менее 10 мкм.

Карбонаты представлены кальцитом и сидеритом. Сидеритовые и кальцитовые агрегаты в основном неправильной формы тонкокристаллического строения, присутствуют в цементе как в виде гнезд различного размера, так и в прожилках. По существу, это средне-мелкокристаллические агрегаты, сформированные зернами идиоморфной и неправильной форм, плотно прилегающим друг к другу. Отмечается выполнение полостей карбонатами, которые тесно ассоциируют с силикатами и алюмофосфатами.

Минералогические особенности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд (переменный гранулярный состав, нередко высокая дисперсность, полиминеральный состав, обусловленный одновременным присутствием различных парагенезисов, различная форма нахождения ниобия и редких земель, изоморфные замещения в структуре минералов, близость их физических свойств) определяют невозможность обогащения этих руд методами глубокого обогащения. Поэтому перспективы переработки руд следует связывать с гидрометаллургическим переделом.

ОСОБЕННОСТИ МОНАЦИТА, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЕГО ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИЗ РЕДКОЗЕМЕЛЬНО-ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Сычева Н. А., Иоспа А. В., Мартиросян О. В.

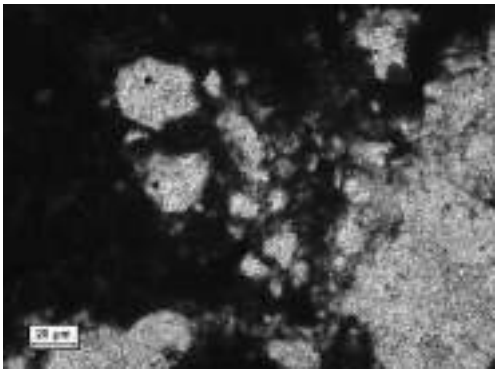
ФГБУ «ВИМС», г. Москва, nel-nadya@mail.ru

В последние годы возрос интерес к редкометалльному и редкоземельному сырью, которое в большинстве своем отличается весьма сложным минеральным составом, высокой дисперсностью и крайне неравномерным распределением полезных минералов. Примером такого сырья являются ниобий-редкоземельные руды Чуктуконского месторождения, которое расположено на юго-западе Сибирской платформы в южной части Чадобецкого поднятия и приурочено к латеритным корам выветривания карбонатитов. До глубины 150–200 м кора выветривания сформирована мощной толщей рыхлых охристых продуктов выветривания, с которой связаны два главных типа руды: редкоземельный и ниобий-редкоземельный. По минеральному составу эти руды относятся к гетитовому типу. Содержание REE в охристых рудах составляет 3–6 %, Nb_2O_5 – 1–1,5 %, Y_2O_3 – 0,1–0,3 %. Руды практически целиком сложены вторичными гипергенными минералами, среди которых преобладают оксиды и гидроксиды железа и марганца (гетит, гематит, псиломелан, пиролюзит). Редкоземельные минералы представлены монацитом, двойными водными фосфатами группы крандаллита (флоренситом, горсейкситом, гояцитом), церианитом, а также ксенотимом. Редкометалльная минерализация представлена вторичными стронцио-, барио- и цериопирохлорами. Остальные минералы присутствуют в переменном количестве (каолинит, кварц, апатит, анатаз, рутил, кальцит и др.). Руды отличаются высокой дисперсностью всех слагающих их минералов. Природная крупность основной части руды менее 0,044 мм.

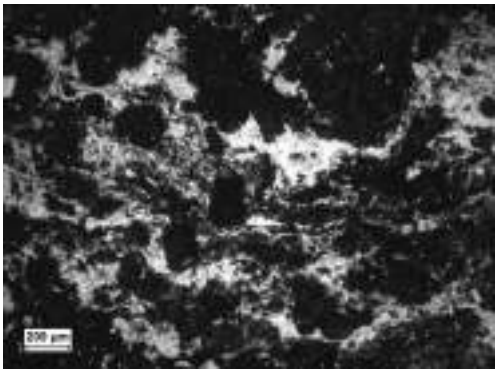
Одним из главных носителей редкоземельного оруденения является монацит. Содержание его в коре выветривания достигает 13 %. Присутствует гипергенный монацит, образовавшийся за счет растворения первичного апатита, а также других минералов карбонатитов. В шлифах в скрещенных николях среди тонкодисперсного агрегата монацита иногда отмечаются реликты минерала, по оптическим характеристикам близкого к апатиту, и наблюдаются полные псевдоморфозы монацита по гексагональным зернам, вероятно, апатита (рис. 1, а).

Монацит присутствует в охристых рудах в тонкодисперсных полиминеральных агрегатах, где находится в тесной ассоциации с гидроксидами железа, минералами группы крандаллита и минералами марганца. Тонкодисперсный монацит, по всей видимости, достаточно равномерно распылен в гетитовой матрице. В нефильтрованном свете ртутно-кварцевой лампы (ДРК-120 в осветителе ОИ-18) агрегаты гетита приобретают насыщенную зеленую окраску, связанную с реабсорбцией линии 546 нм, происходящей на оптически активных центрах Nd^{3+}, входящего в состав монацита.

Иногда монацит образует относительно крупные мономинеральные скопления размером несколько миллиметров – первые сантиметры, или тонкие струевидные прослойки в гетит-крандаллитовой массе (рис. 1, б).



а

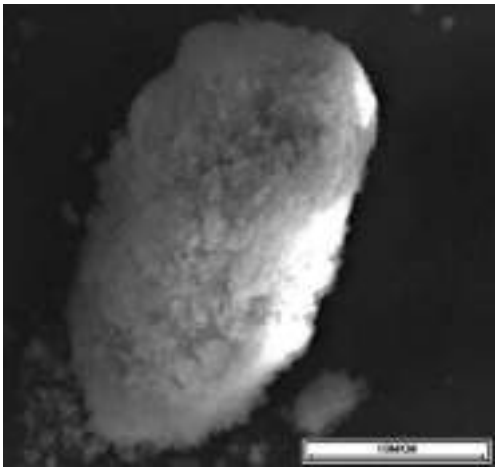


б

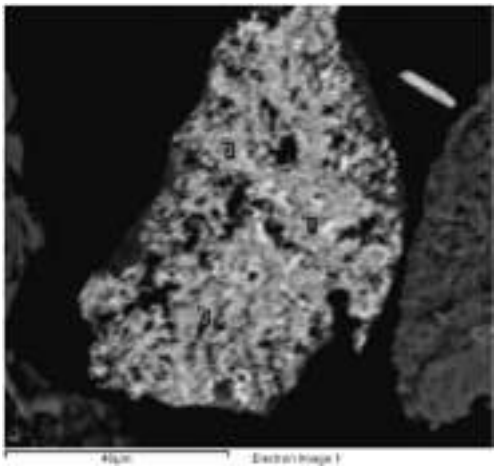
Рис. 1. а) Полная псевдоморфоза монацита по гексагональному зерну апатита (верхний левый угол); б) струевидные прослойки монацита в охристой руде; белое, светло-желтое – монацит, рыжевато-бурое – гидроксиды железа. Проходящий свет, николи параллельны

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что агрегаты монацита сформированы в различной степени индивидуализированными зернами таблитчатой и удлиненно-призматической формы размером первые микрометры (1–6 мкм).

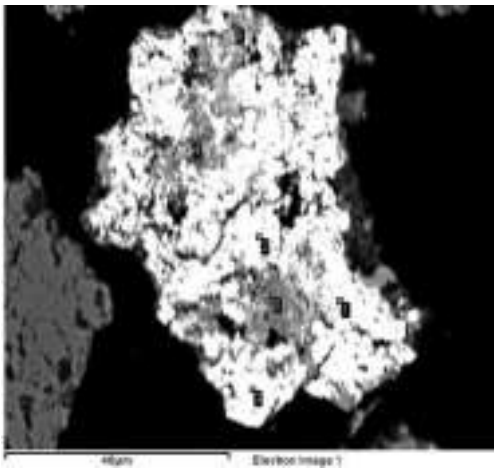
Окраска монацита зависит от интенсивности пигментации оксидами и гидроксидами железа и марганца и изменяется от светло-желтой до темно-бурой. Минерал покрыт пленкой гидроксидов железа и марганца (рис. 2, а). Эта особенность не позволяет определять и изучать характер раскрываемости монацита традиционными методами оптической микроскопии. С другой стороны, изучение руд микрорентгеноспектральным анализом с учетом элементного состава фаз показало, что монацит не раскрывается даже в тонком классе крупности (–0,074+0,044 мм) (рис. 2, б, в, г).



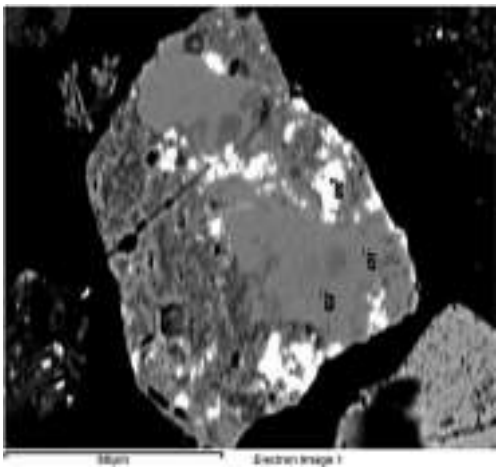
а



б



в



г

Рис. 2. а) Монацит в «рубашке» из гидроксидов железа, РЭМ; б)и в) тонкодисперсный агрегат монацита (белое) с гетитом (серое); г) включения монацита (белое) в гетите (серое); материал класса крупности –0,074+0,044 мм, изображение в отраженных электронах

Минерал очень хрупкий и легко переизмельчается, вследствие чего его распределение имеет тенденцию увеличения в сторону тонких классов крупности. Рентгенографический фазовый анализ показал, что содержание монацита в материале класса крупности –0,044+0 мм возрастает в два раза по сравнению с более крупными классами (–0,2+0,1мм, –0,1+0,074мм, –0,074+0,044 мм) (табл. 1, рис. 3).

Таблица 1

Распределение монацита по классам крупности

Класс крупности, мм	Содержание монацита, %
–0,2+0,1	10
–0,1+0,074	10
–0,074+0,044	11
–0,044+0	20

Химический состав монацита приведен в таблице 2. Минерал представлен в основном La-Ce-ми разновидностями, содержит Pr, Nd, иногда Sm и Th, редко – Y. Содержание (мас. %) Ce в монаците варьирует от 4,29 до 29,07, La – от 11,08 до 22,99, Pr – от 0,73 до 2,92, Nd – от 3,18 до 10,40, Sm – от 0 до 1,30, Th – от 0 до 1,67, P – от 9,57 до 12,35, Ca – от 0,65 до 3,02, Sr – от 0 до 3,35, Y – от 0 до 1,32. Кроме того, в монаците практически постоянно присутствуют Fe и Mn, содержание которых может достигать 8 %, которые связаны с механическими примесями оксидов и гидроксидов железа и марганца. Переменный химический состав монацита приводит к изменению его технологических свойств (плотности, удельной поверхности, твердости), что непосредственно отразится на его поведении в обогатительном процессе.

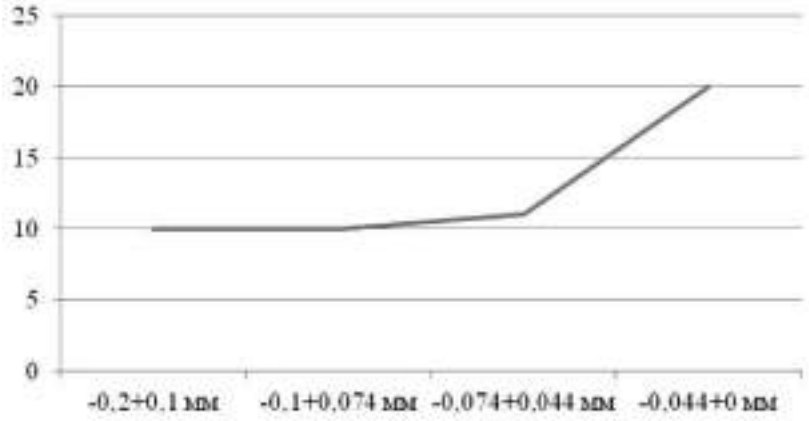


Рис. 3. График распределения монацита по классам крупности

Таблица 2

Химический состав (масс. %) монацита из охристых руд

№ п/п	O	P	Ca	Mn	Fe	Sr	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Th	Сумма	Описание
1	22,97	10,17	1,26	0	2,46	2,11	0	11,09	20,58	1,90	6,85	0,52	1,27	79,91	пористое выделение в срастаниях с гетитом
2	25,68	11,19	1,39	0	1,73	2,58	0	11,08	21,01	1,08	6,95	0,89	0	83,58	
3	24,70	10,52	2,10	0,32	4,57	0,76	0	15,74	8,74	2,04	8,28	0,32	0	78,09	
4	24,49	10,63	1,99	0,54	4,18	0,93	0	15,96	9,87	2,01	8,65	0,70	0	79,95	
5	28,46	10,54	2,05	1,1	6,34	0	0	17,05	4,98	2,43	10,32	0,59	0	83,86	тонкие включения в минералах марганца и железа
6	25,58	11,24	1,91	2,53	1,72	0	1,32	18,38	4,29	2,92	10,40	1,30	0	81,59	
7	24,20	9,57	0,65	5,88	8,36	1,39	0	17,40	15,39	0,73	3,41	0	0	86,98	
8	21,91	11,04	0,87	3,45	1,56	0	0	16,52	21,61	1,22	5,93	0	0	84,11	
9	26,18	11,83	0,97	0	1,40	1,25	0	18,92	24,11	1,23	4,92	0,52	0	91,33	включение в минералах железа
10	25,06	11,08	0,81	0	2,22	1,04	0	20,81	22,98	1,33	3,18	0	0	88,51	
11	29,37	11,21	3,02	0	2,24	1,65	0	16,91	16,25	2,54	7,87	0,83	1,67	93,56	
12	26,25	11,93	0,95	0	0,76	1,51	0	20,03	23,22	1,13	5,23	0,86	0	91,87	сплошное выделение
13	24,34	11,05	0,81	0	1,05	1,39	0	20,49	21,49	1,03	3,41	0	0	85,06	
14	24,47	11,80	0,76	0	0	1,44	0	22,99	22,49	0,77	3,36	0	0	88,08	пористое выделение
15	22,82	11,24	1,36	0	0,67	1,39	0	15,88	18,87	1,24	7,48	0,56	1,25	82,76	
16	23,49	11,26	1,30	0	0,47	1,26	0	15,19	19,70	1,39	7,05	0,25	0,95	82,31	
17	25,23	11,91	1,39	0	0	2,51	0	13,65	29,07	2,00	5,94	0	0,94	92,64	
18	25,38	11,52	1,97	0	0	3,02	0	18,39	23,70	1,22	4,85	0	0,43	90,48	
19	25,98	12,35	1,35	0	0	3,35	0	14,09	27,48	1,48	5,95	0	0,36	92,39	
Среднее	25,08	11,16	1,42	0,73	2,09	1,45	0,07	16,87	18,73	1,56	6,32	0,39	0,36	86,16	

Для максимально чистого от механических примесей монацита были рассчитаны параметры элементарной ячейки: a=6,81±0,01, b=6,99±0,01, c=6,48±0,01. Полученные параметры соответствуют монациту промежуточного состава между цериевой (a=6,7902, b=7,0203, c=6,4674) и лантановой (a=6,8357, b=7,0700, c=6,5026) разновидностями.

Природные особенности монацита, а именно: высокая дисперсность, тесные срастания с оксидами и гидроксидами железа и марганца, повышенная хрупкость и склонность к переизмельчению, обуславливают невозможность его раскрытия, а, следовательно, селективного извлечения минерала физическими методами. Извлечение ценных компонентов из охристых руд возможно методами химико-металлургического обогащения.

НАНОМИНЕРАЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТЫХ И ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫХ РУД ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОГО УЗБЕКИСТАНА

Конеев Р. И. [1], Халматов Р. А. [2], Намазбаев Ш. Н. [3],Утяганов М. А. [3]

[1]Национальный университет Узбекистана (НУУз), г. Ташкент, Узбекистан;
[2]Учебно-экспериментальный Центр высоких технологий (УЭ ЦВТ), г. Ташкент, Узбекистан;
[3] НПЦ «Геология драгоценных металлов и урана» Навоийский горно-металлургический комбинат (НПЦ ГДМУ НГМК), г. Навои, Узбекистан, ri. koneev@gmail. com

Республика Узбекистан является одной из ведущих стран мира по запасам и добыче золота, а ее Западная часть относится к крупнейшим золотоносным провинциям с такими известными месторождениями, как Мурунтау, Амантайтау, Кокпатас, Зармитан и др. Месторождения приурочены к Южно-Тяньшанскому орогеническому поясу, сформировавшемуся в результате субдукционно-коллизинных процессов и размещаются в так называемых «черных сланцах» и гранитоидном интрузиве. Они образуют Кызылкумский и Нуратинский горно-рудные районы [1, 2].

Многолетняя эксплуатация промышленных золоторудных месторождений неизбежно привела к увеличению глубины горных выработок, и, соответственно, к изменению многих, в том числе и технологических свойств золотых и золото-серебряных руд. Особенно заметные изменения происходят с вещественным, минеральным составом, который в значительной мере определяет технологии обогащения и извлечения золота [3, 4]. Прежде всего, происходит переход от окисленных руд со свободным, крупным золотом к первичным сульфидным, «упорным» рудам с тонкодисперсным, «невидимым» золотом. Меняются ассоциации минералов, степень сульфидности руд, соотношение классов крупности самородного золота, пробность и состав его соединений и т. д. Подобные изменения в первичных рудах связаны также с классической вертикальной зональностью отложения элементов, минералов и минеральных ассоциаций [5]. Определив градиент зональности можно заранее прогнозировать изменение состава руд с глубиной.

Изучение первичных руд проводилось, с использованием методологии и методики нового направления минералогии – наноминералогии, в связи с тем, что золото в них типичный микро-наноминерал размером от 100 мкм до 10 нм [6, 7]. Основной тезис наноминералогии заключается в том, что все свойства минералов существенно меняются при уменьшении их размеров до наношкалы – 10^{-6}–10^{-9} м, в связи с увеличением удельной поверхностной энергии наночастиц и проявления размерных эффектов. Вследствие естественных, природных нанотехнологий в процессах рудообразования, все минералы проходят этап наносостояния и многие из них остаются «карликами» (нано). Реальные наноминералы, особенно рудные, чаще всего по размеру выходят за пределы наношкалы, т. к. в их составе участвуют атомы тяжелых элементов с радиусами гораздо больше, чем у атомов углерода. Поэтому в рудах речь идет скорее о микро-наноансамблях минералов. Для золота установлено, что этот «благородный» металл в наноразмерах становится химически активным и образует соединения со многими элементами,

вплоть до серы и кислорода. Нанозолото плывет в воде, а температура его плавления снижается на несколько сот градусов, что, видимо, влияет на результаты пробирного и других анализов. Измельчение руд при обогащении, также является своеобразным нанотехнологическим процессом, который приводит к образованию обломочных «малых» частиц с аномальными свойствами [8].

Основным инструментом для проведения наноминералогических исследований был электронно-зондовый микроанализатор Jeol Superprobe 8800R, при этом акцент делался на изучение рудных минералов, включающих или сопровождающих золото, образуя с ним тесные микро-наноансамбли. Золото извлекается из грави-флотоконцентратов, а нерудные минералы обычно выбрасываются в хвосты, причем многие из них негативно влияют на процессы обогащения и извлечения. Так углеродистое вещество сорбирует золото при цианировании, а слюды, глинистые минералы и др. являются шламообразующими и затрудняют дробление, сгущение, флотацию и т. д. [3].

Наноминералогические исследования вещественного состава первичных руд золотых и золото-серебряных месторождений Узбекистана показали, что золото в них не только самородное свободное или невидимое упорное. Оно образует различные соединения и микро-наноансамбли с минералами Te, Se, Bi, Sb, Hg, Ag, Pb и др. в строгом соответствии с термодинамическими, физико-химическими условиями и минерально-геохимической зональностью. Их сочетание не может быть произвольным и формируется в соответствии с определенными законами и правилами. Эти минералы не являются редкими или «второстепенными». По распространенности и размерам они не уступают и даже превосходят золото, определяя его геохимию и минералогию. Но золото экономически важный минерал и поэтому относится к главным. Мир микронаноминералов шире, разнообразнее и более информативен. Если ориентироваться только на главные рудослагающие сульфиды, то все руды по их набору идентичны: пирит, арсенопирит, халькопирит, галенит, сфалерит, антимонит.

На основе полученных данных была разработана классификация золотых руд с выделением стандартного ряда минерально-геохимических типов, которые образуются на всех месторождениях независимо от состава вмещающих пород, метасоматитов, формы рудных тел и других геологических особенностей [9, 2]. Выделены следующие типы: Au-W, редкометалльный; Au-Bi-Te, висмут-теллуридный; Au-As, арсенопирит-пиритовый; Au-Ag-Te, золото-серебро-теллуридный; Au-Ag-Se, сульфосольно-селенидный; Au-Sb, антимонит-сульфоантимонидный; Au-Hg, киноварный. Практически, минерально-геохимические типы совпадают с выделяемыми технологическими типами руд [3].

Au-W, редкометалльный, шеелит-молибденитовый с редкими наночастицами золота. Является дорудным и все последующие золотопродуктивные типы накладываются на Au-W. Поэтому, например на Мурунтау считается, что 85 % олота сосредоточено в золото-вольфрамовых рудных телах.

Au-As, пирит-арсенопиритовый или арсенопирит-пиритовый (Мурунтау, Зармитан). В составе установлены также Ni-Co минералы – кобальтин, герсдорфит, пентландит и др. Золото «невидимое» тяготеет к мышьяковистым зонам в пирите (до 0,1–0,5 %). В арсенопирите отдельные зоны могут быть обогащены золотом до 8 % (табл. 1). Предполагается развитие золото-серно-мышьяковых соединений, изоструктурных с арсенопиритом и As-пиритом. Отмечаются микро-наноансамбли золота и других минералов (рис. 1). Пирит и арсенопирит являются главными сульфидами руд и масштабы развития нанозолота могут быть значительными. Такие руды обычно флотируют с последующим цианированием концентрата или огарков обжига.

Au-Bi-Te, висмут-теллуридный тип отличается развитием теллуридов и сульфотеллуридов исключительно висмута – пильзенит, хедлейит, цумоит, ингодит, сульфоцумоит, жозеит. В мезо-эпитермальных условиях появляются Ag-Pb-Sb-сульфовисмутиды. Золото в виде микро-нановключений самородных частиц и мальдонита (Au_2Bi), образующих характерные ансамбли (рис. 2). В более низкотемпературных условиях появляются Au-Ag теллуриды: петцит ($AuAg_3Te_2$), калаверит ($AuTe_2$) (табл. 1). Теллуриды являются хрупкими и при дроблении обогащают мелкие фракции. Отличаются флотоактивностью и низкой скоростью растворения при цианировании.

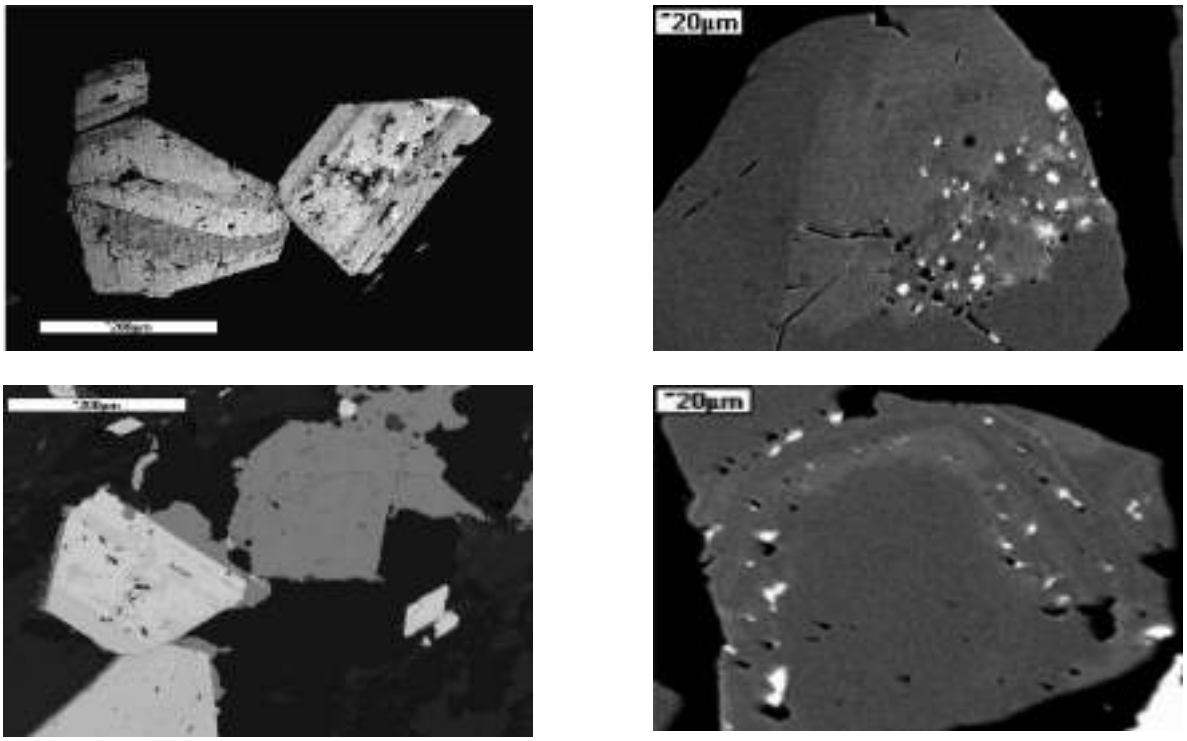


Рис. 1. Зональный арсенопирит (I-ый ряд) и As-пирит с микро-нановключениями золота и арсенопирита. (II-ой ряд) Au-As тип руд. Снимки во вторичных электронах

Таблица 1

Химический состав соединений золота в рудах эндогенных месторождений Западного Узбекистана, %

Тип руды, объект	Минерал	Au	Ag	Hg	Bi	Sb	As	Fe	Ni	Te	Se	S	Σ
Au-As Урусай	Au-арсенопирит Fe(AuAsS)	5,58	0,50	–	–	0,32	35,49	30,66	2,00	–	–	24,90	99,45
		7,78	1,08	–	–	0,24	32,28	30,44	1,52	–	–	26,54	99,88
Мютенбай		0,49	–	–	–	–	49,01	31,40	–	–	–	18,72	99,62
		0,27	–	–	–	–	49,18	31,50	–	–	–	19,08	100,03
Au-Bi-Te Мютенбай	Мальдонит Au_2Bi	62,08	0,63	–	34,29	–	–	–	–	0,34	2,09	–	99,43
		64,68	–	–	34,80	–	0,72	–	–	–	–	0,18	100,38
Триада		64,25	–	–	35,32	–	0,09	–	–	–	–	0,76	100,42
		64,08	–	–	35,04	–	–	–	–	0,27	–	0,47	99,86
Триада	Фаза Au-Bi-Te	21,82	–	–	61,90	–	0,52	0,80	–	14,70	–	–	99,09
		22,65	–	–	62,01	–	0,53	–	–	13,90	–	0,64	99,73
Au-Ag-Te Амантайтау	Калаверит $AuTe_2$	44,48	0,35	–	–	–	–	–	–	55,27	–	0,40	100,5
		44,18	0,17	–	–	–	–	–	–	55,96	–	–	100,31
Гужумсай	Петцит $AuAg_3Te_2$	23,59	42,70	–	–	–	–	0,93	–	33,14	–	–	100,83
		23,24	42,32	–	–	–	–	0,80	–	33,51	–	–	100,3
Au-Ag-Se Аджибугут	Фишессерит $AuAg_3Se_2$	29,17	46,76	–	–	–	0,27	–	–	–	23,85	–	100,05
		28,71	46,57	–	–	–	0,41	–	–	–	23,30	–	98,99
		28,34	48,47	–	–	–	0,22	–	–	–	22,89	–	99,92
	Петровскаит AuAgS	54,29	36,42	–	–	–	–	–	–	–	–	8,92	99,92
		53,40	36,73	–	–	–	–	–	–	–	–	9,48	100,46
Au-Sb Амантайтау	Ауростибит $AuSb_2$	44,02	–	–	–	52,44	0,56	0,75	1,71	–	–	0,53	100,01
		43,14	–	–	–	53,44	0,56	0,75	1,71	–	–	0,53	100,13
		42,92	–	–	–	53,62	0,43	0,55	2,21	–	–	0,32	100,05
Au-Hg Амантайтау	Hg-золото AuAgHg	90,70	5,70	2,87	–	–	–	–	–	–	–	–	99,27
		94,08	2,79	3,07	–	–	–	–	–	–	–	–	99,94

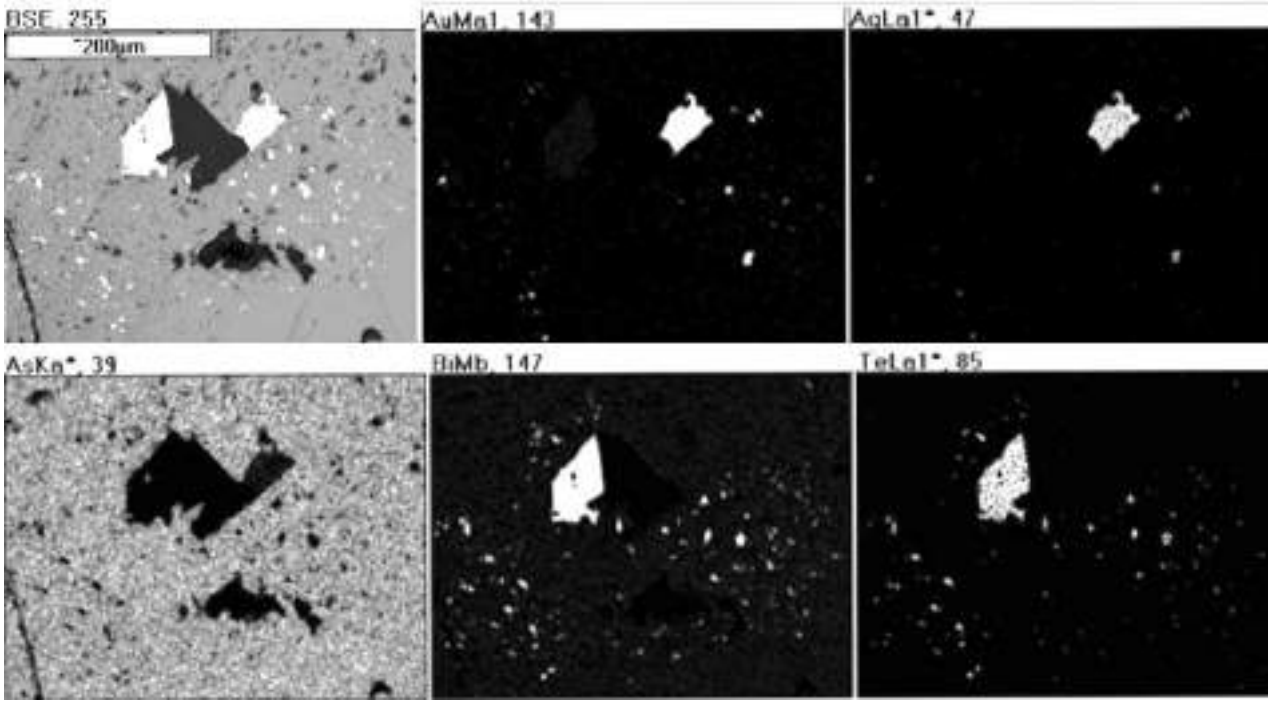


Рис. 2. Микро-наноансамбли самородного золота, мальдонита и висмутовых теллуридов в арсенопирите. Au-Bi-Te тип. Снимки распределения элементов

Au-Ag-Se, сульфосольно-селенидный тип. Характерны сульфосоли серебра: полибазит, пираргирит, стефанит, пирсеит и селениды серебра – науманнит, агвиларит. Золото в виде электрума (AuAg), кюстелита ($AuAg_3$), петровскаита (AuAgS) и фишессерита ($AuAg_3Se_2$), (табл. 1, рис. 3). За исключением ковких самородного серебра и акантита, остальные минералы серебра хрупкие, при дроблении становятся очень мелкими и не извлекаются отсадкой, но являются флотоактивными.

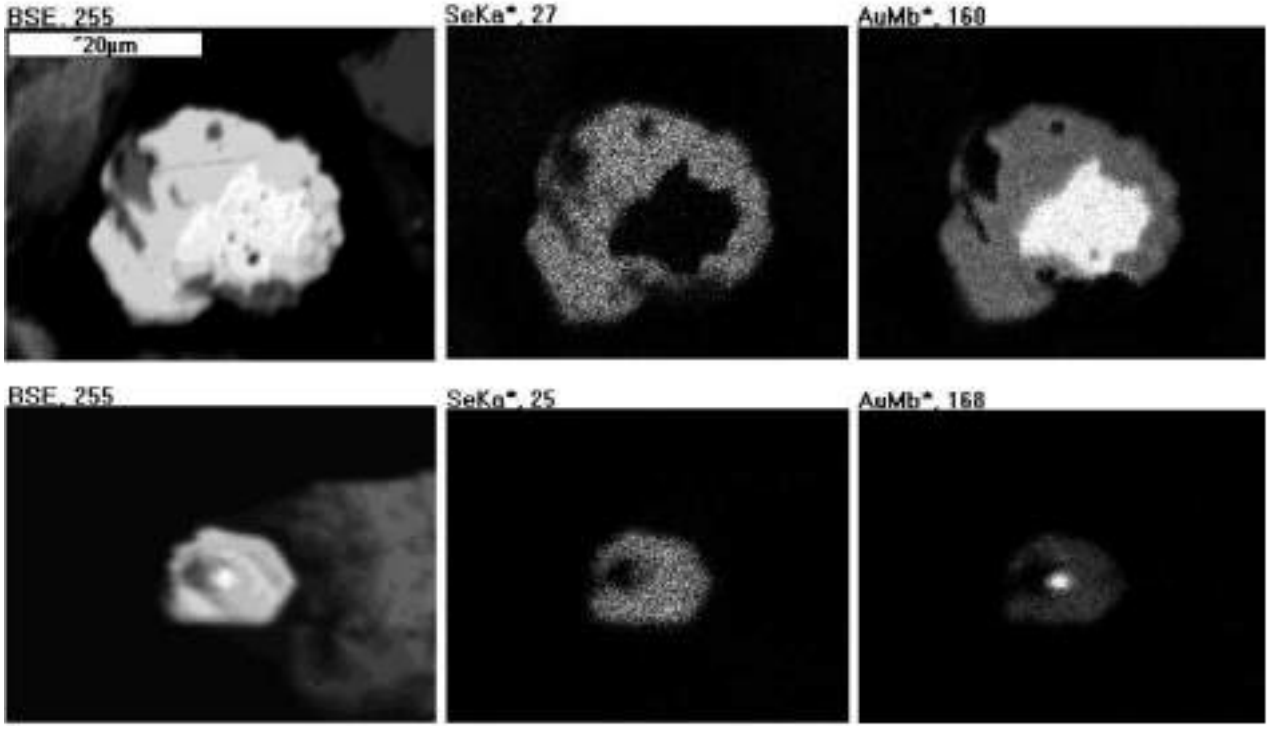


Рис. 3. Самородное золото в фишессерите. Au-Ag-Se тип. Снимки распределения элементов

Au-Sb, антимонит-сульфоантимонидный тип. Широко распространен в таких месторождениях Западного Узбекистана, как Даугызтау, Амантайтау, Кокпатас, Гужумсай, Урталик, Зармитан. Антимонит является главным минералом этого типа руд, но в микро-наноминеральной форме широко распространены сульфоантимониды, преимущественно свинца: буланжерит, цинкенит, семсейит, джемсонит, бурнонит и др. Кроме самородного золота и электрума в антимоните, типоморфным минералом является $AuSb_2$ – аурости-бит (рис. 4, табл. 1). Наиболее эффективным способом обработки Au-Sb руд является флотация с получением пиритного и сурьмяного концентратов.

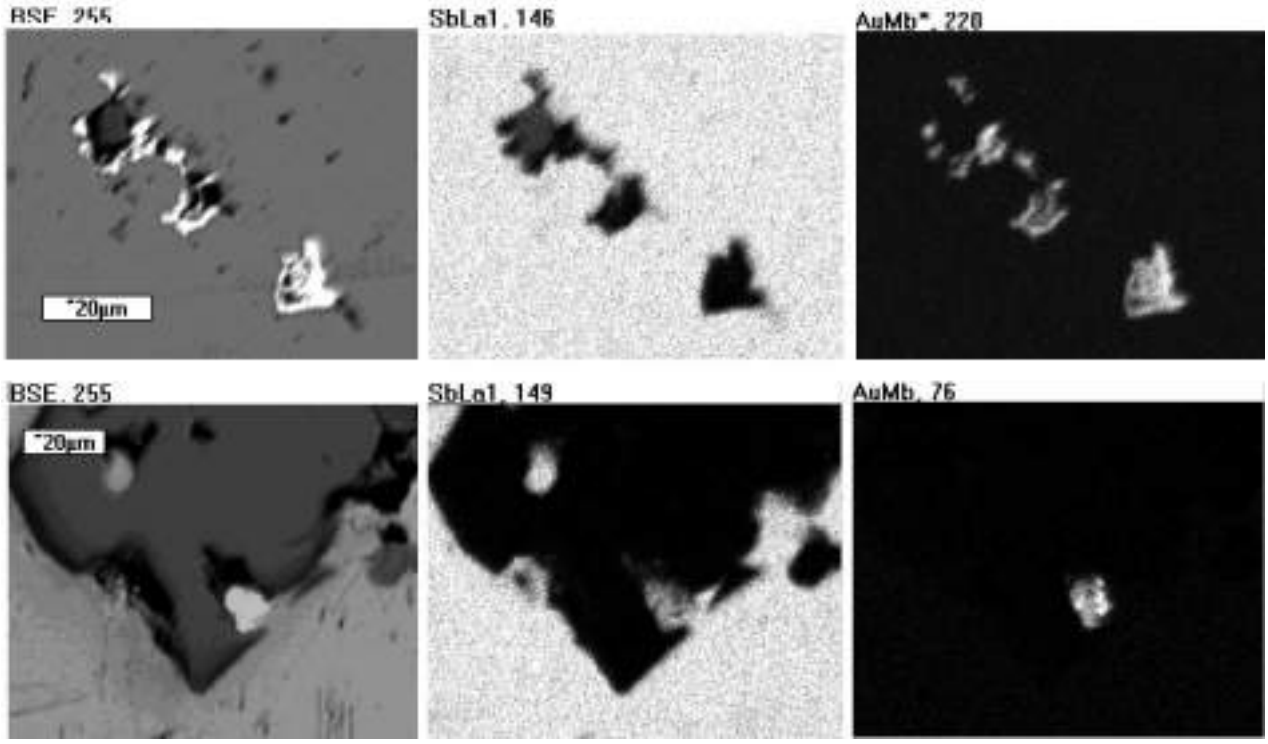


Рис. 4. Самородное золото в антимоните (I-ый ряд) и аурости-бит в кристалле арсенопирита, заключенного в антимонит (II-ой ряд). Au-Sb тип. Снимки распределения элементов

Au-Hg, киноварный тип промышленного значения в Узбекистане не имеет, но проявлен в месторождениях в виде киновари, конгсбергита, ртутистого золота и др. Отмечаются и отдельные рудопроявления киновари.

Выделенный ряд минерально-геохимических типов является стандартным для всех золоторудных месторождений, но промышленный ресурс определяют от двух до пяти типов в зависимости от физико-химических условий рудообразования, элементов вертикальной и латеральной зональности, уровня эрозионного среза и т. д. Как правило, промышленные типы совмещаются в геологическом пространстве, с доминированием определенных из них в отдельных блоках (табл. 2). Эта особенность чрезвычайно затрудняет выбор оптимальной технологической схемы в целом для месторождения. В тоже время, телескопирование разных типов приводит к возрастанию концентрации золота до ураганных содержаний и увеличению количества минералов. Превышение их числа более 100 видов является индикатором крупных месторождений [10].

Прямыми признаками развития конкретного минерально-геохимического (технологического) типа являются соединения золота: Fe(AuAsS)-Au_2Bi-$AuTe_2$–$AuAg_3Te_2$–AuAgS-$AuAg_3Se_2$–$AuSb_2$–(AuAg)Hg, его микро-наноансамбли неповторяющихся минералов и геохимические ассоциации соответствующих элементов – Te, Se, Bi, Sb, As, Hg и др. [11].

Перечисленные наноминералогические особенности различных типов руд очевидно влияют на процессы обогащения и извлечения золота. Многие проблемы связаны с возрастающим значением в первичных сульфидных рудах наноминералов золота и различных соединений с Bi, Sb, As, Te, Se, S и др., влияние которых на технологические процессы изучено явно недостаточно.

Таблица 2

Типы, вещественный состав руд золотых и золото-серебряных месторождений Западного Узбекистана

Месторождение, формация	Главные типы руд	Минералы		Соединения золота	Микро-наноминеральные ансамбли	Примечание
		нерудные	рудные			
Мурунтау Мютенбай Триада Золото-кварцевая	Au-W, редкометалльный Au-As, арсенопирит-пиритовый; Au-Bi-Te, висмут-теллуридный	Кварц, альбит, микроклин, биотит, хлорит, углистое вещество	Арсенопирит, пирит, шеелит, молибденит, кобальтин, герсдорфит, пирротин	Самородное (500–1000‰), мальдонит (Au2Bi), Fe(AuAsS)	Пильзенит, хедлейит, ингодит, цумоит, жозеит, кобеллит, густавит, матильдит и др. соединения Bi с Ag, Sb, Pb, Te, Se	Au-W, Au-As – основной объем рудных залежей. Au-Bi-Te – главный продуктивный
Амантайтау Даугызтау Кокпатас Золото-сульфидная	Au-As, пирит-арсенопиритовый; Au-Ag-Te, серебро-теллуридный Au-Sb, антимонит-сульфоантимонидный	Кварц, карбонат, хлорит, серицит, полевые шпаты, углистое вещество	Пирит, арсенопирит, антимонит, тетраэдрит, галенит, герсдорфит	Самородное, электрум (300–800‰), ауростибит (AuSb2), Fe(AuAsS), петцит (AuAg3Te2)	Джемсонит, бурнонит, буланжерит, цинкенит, миаргирит, андорит, халькостибит и др. соединения Sb с Pb, Fe, Ag, Cu, Se.	Золото упорное. Флотация с раздельными пиритовым и антимонитовым концентратами
Косманачи Высоковольтное Аджибугут Золото-серебряная	Au-As, пирит-арсенопиритовый; Au-Ag-Se, сульфосольно-селенидный Au-Sb-антимонит-сульфоантимонидный	Кварц, карбонат, серицит, ортоклаз, углистое вещество	Пирит, арсенопирит, галенит, халькопирит, акантит, фрейбергит, герсдорфит	Электрум, кюстелит (300–600‰), петровскаит (AuAgS), фишессерит (Ag3AuSe2)	Самородное серебро, фрейбергит, пираргирит, полибазит, буланжерит, бурнонит, науманнит, агвиларит, гессит и др. соединениями Ag с Sb, Cu, Pb, Se, Te	Руды существенно серебряные, Au:Ag до 1:500. Селективная флотация
Зармитан Урталик Гужумсай Золото-сульфидно-кварцевая	Au-W, редкометалльный Au-As, арсенопирит-пиритовый; Au-Bi-Te, висмут-теллуридный; Au-Sb, антимонит-сульфоантимонидный; Au-Ag-Se, сульфосольно-селенидный	Кварц, карбонат, альбит, микроклин, серицит, мусковит	Арсенопирит, пирит, шеелит, антимонит, халькопирит, галенит, тетраэдрит, леллингит, герсдорфит	Самородное, электрум (400–1000‰), мальдонит (Au2Bi), ауростибит (AuSb2), петцит (AuAg3Te2) Fe(AgAsS)	Пильзенит, хедлейит, цумоит, жозеит, кобеллит, густавит, буланжерит, джемсонит, бурнонит, миаргирит, пираргирит, науманнит, гессит	Au-Bi-Te – главный продуктивный. Золотые и золото-серебряные руды

ЛИТЕРАТУРА

1. Richard J. Goldfarb, Ryan D. Taylor, Gregory S. Collins et. al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. Elsevier. 2013. P. 1–55.
2. Конеев Р. И., Халматов Р. А. Некоторые аспекты минералогии, геохимии и генезиса руд месторождений золота Узбекистана. // Руды и металлы, 2013, № 2. С. 32–38.
3. Зеленов В. И. Методика исследования золото и серебро-содержащих руд. М.: Недра, 1989. 302 с.
4. Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб: Наука, 1997. 582 с.
5. Шнейдерхен Г. Рудные месторождения. М: ИЛ, 1958, 501 с.
6. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. СПб.: Наука, ред. Н. П. Юшкин и др. 2005. 518 с.
7. Конеев Р. И. Наноминералогия золота эпитермальных месторождений Чаткало-Кураминского региона. СПб: Дельта, 2006. 218 с.
8. Ревнивцев В. И., Доливо-Добровольская Г. И., Владимиров П. С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб: Наука, 1992. 243 с.
9. Кременецкий А. А., Минцер Э. Ф. Универсальность золоторудных систем – ключевой критерий регионального прогноза промышленного оруденения // Отечественная геология, 1995, № 1. С. 19–27.
10. Томсон И. Н., Полякова О. П. Особенности локализации, строения и состава крупных и уникальных месторождений цветных и благородных металлов // Отечественная геология, 1994, № С. 24–30.
11. Конеев Р. И., Халматов Р. А., Мун Ю. С. Наноминералогия и наногеохимия руд месторождений золота Узбекистана // Записки РМО.,2010, № 2. С. 1–14.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗОЛОТОНОСНОЙ РУДЫ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Усманова Н. Ф. [1,2]***, Брагин В. И.*** [2,1]***, Меркулова Е. Н.*** [1]***, Жижаев А. М.*** [1]

[1] *ИХХТ СО РАН, г. Красноярск,*
[2] *СФУ, г. Красноярск*

Помимо изысканий в геологии, геохимические методы анализа широко применяют для оценки влияния тяжелых элементов на состояние почв промышленных городов [8], тропических регионов [16, 10], донных отложений рек и озер [5, 15, 11]. В зарубежной практике методики геохимического анализа, в различных вариациях, используют для изучения мобильности элементов тяжелых и цветных металлов в хвостах обогащения, отходах шахтной добычи [13, 17] на полигонах хвостохранилищ [6, 12, 7]. В исследованиях руд на обогатимость традиционно для изучения исходного сырья применяют минералогический, химический анализы, изучают распределение ценных компонентов по классам крупности. В современных минералогических исследованиях широко применяются оптическая, сканирующая электронная микроскопия с различным порогом обнаружения, позволяющие определять микронные и наноразмерные крупности ценных компонентов, детально изучать взаимопрорастания рудных минералов с породообразующей составляющей. В то же время не всегда удается получить исчерпывающую информацию для разработки эффективной технологии обогащения, особенно труднообогатимых руд, массово вовлекаемых в переработку в последние годы. В таких случаях проведение дополнительных исследований, в частности, по методикам геохимического анализа, позволяет получить развернутые сведения о взаимосвязи различных элементов в матрице рудных и породообразующих минералов. Результаты геохимического анализа дают информацию о водорастворимых и ионообменные формы ценных компонентов и породообразующей составляющей, о связи ценных компонентов с кристаллическими и аморфными оксидами, с сульфидами, органическими соединениями, с карбонатами и сульфатами.

В рамках комплексного изучения золотосодержащей руды коры выветривания Енисейского кряжа, помимо традиционных минералогических исследований, рентгенофазового анализа (РФА), выполнен геохимический анализ исходного сырья.

Используемая нами методика проведения геохимического анализа базируется на этапах, которые применялись в работах [13, 14, 9]. Схема проведения исследований приведена на рис. 1. В отличие от методик, представленных в [13, 14] исключили выщелачивание на первоначальном этапе в дигидрофосфате калия или деионизированной воде. Для определения водорастворимых и обменных форм в исследуемых образцах первый этап проводили с ацетатом аммония в кислой среде, который в методике [9] применяли для селективного разделения обменных форм.

На втором этапе, с добавлением уксусной кислоты, в жидкую фазу выделяли карбонатную и сульфатную составляющие. Далее на последующем этапе формы минералов, связанные с органической составляющей экстрагировали с применением пирофосфата натрия в щелочных условиях. На четвертом этапе для определения аморфных оксидов использовали раствор гидроксиламин гидрохлорида в соляной кислоте. Для экстракции кристаллических оксидов на следующем этапе применяли раствор $NH_2OHxHCl$ в уксусной кислоте. На завершающей стадии кек растворяли в «царской водке» для определения концентрации благородных элементов и нерастворенной ранее сульфидной и металлоидной фракции.

Исходную руду и твердую фазу после каждого этапа выщелачивания изучали рентгенофазовым методом. Расчет и расшифровка дифрактограмм осуществлены по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS. Жидкую фазу после каждого этапа выщелачивания анализировали методом масс-спектрометрии на ИСП-МС Agilent 7500a. Содержание золота и серебра в исходной руде определяли пробирной плавкой с атомно-абсорбционным окончанием на спектрометре AAnalist 400 (Perkin Elmer). Минералогическое изучение образцов исходной руды проводили на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000 с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия).

Рис. 1. Условия проведения геохимического анализа

По данным рентгеновской дифракции породообразующие минералы в исследуемой руде представлены кварцем, каолинитом, гетитом, мусковитом. На долю глинистых минералов приходится до 67 %, в максимальной степени представлены в шламе –0,044 мм и в крупных классах, где они образуют плотные агрегаты с кварцем. На кварц и гетит приходится по 16 %, наличие гетита существенно возрастает в классах –0,315+0,074 мм. Кварц преобладает в классах крупнее 5 мм. В незначительном количестве присутствует мусковит, содержание которого повышено в крупных классах (более 5 мм), где он присутствует в составе реликтов сланцев. Кроме того, в исходной руде обнаружен титан в виде псевдобрукита, меньшей степени апатит, фосфаты редкоземельных элементов. По результатам фракционного анализа рудные минералы представлены золотом, в свободном виде и в сростках, пиритом, в незначительных количествах арсенопиритом и их сростками с кварцем и гетитом.

Химический состав исследуемой руды следующий %: SiO_2 – 48. 45; Al_2O_3 – 15. 8; Fe_2O_3 – 18. 39; CaO – 1. 35; MgO – 2. 12; Na_2O – 0. 1; TiO_2 – 2. 56; K_2O – 0. 3; MnO – 0. 2; P_2O_5 – 3. 10; $S_{общ}$ – 0. 079; Zn – 0. 18; Pb – 0. 03; As – < 0. 001. Содержание золота и серебра в исходной руде, составило 2,8 и 2,0 г/т соответственно. Низкое содержание серы, по результатам химического анализа объясняется его потерями при прокаливании.

В исходной руде золото находится в свободном виде в мелких и тонких классах, в сростках с сульфидами и породообразующими минералами. Крупность золотин различная, варьирует от 1–3 до 200 мкм. Золотины в свободном виде имеют причудливые окатанные и полуокатанные формы с извилистым внешним контуром. Частицы золота, заключенные в сростках, имеют губчатую, пористую «изъеденную» структуру, характерную для золота коры выветривания [1]. Золотины часто находятся в сростках с кварцем, хемогенными вторичными минералами – слюдами, гидроксидами железа (рис. 2).

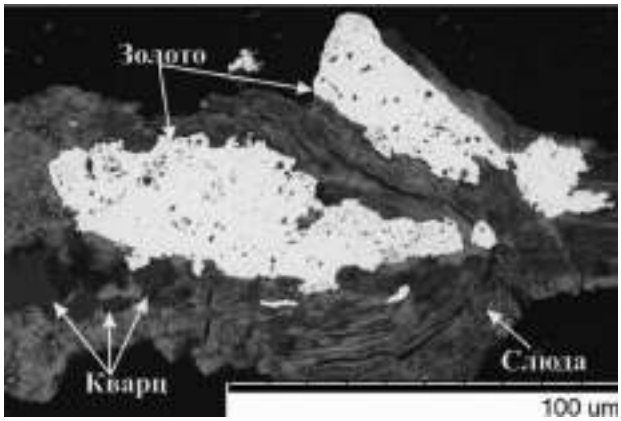


Рис. 2. Золотины в сростках в исходной руде

По результатам проведения геохимического анализа построены гистограммы распределения

золота и основных макроэлементов по формам нахождения в исследуемой руде (рис. 3).

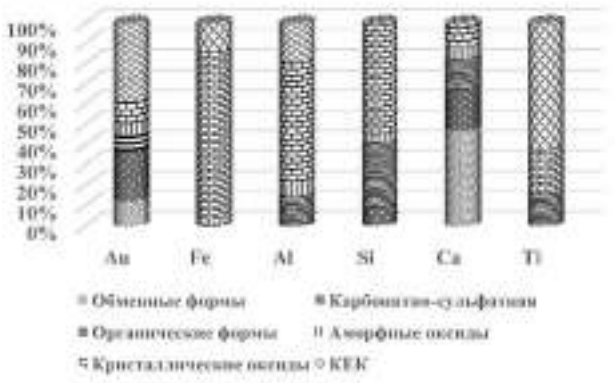


Рис. 3. Гистограмма распределения макроэлементов по формам нахождения в исходном сырье

Данные, полученные поэтапной экстракцией, согласуются с литературными сведениями по обнаружению золота в корах выветривания [1, 2]. Так, наличие золота в обменных формах, указывает на его связь преимущественно с карбонатами [1], которые являются легкорастворимыми минералами. Процессами растворения карбонатов и высвобождением связанного с ними золота обусловлена миграция металла в природных условиях коры выветривания. Кроме того, обнаружение золота в легкорастворимых формах в изучаемой руде можно объяснить его присутствием в исходном сырье в самородной коллоидной форме [2]. Результаты минералогического, химического анализа руды и проведенного геохимического исследования (рис. 2), свидетельствует о взаимосвязи Fe и Au. Основная часть железа заключена в кристаллических оксидах, до 15 % золота также связано с этой фракцией. В кеке, после всех этапов выщелачивания, сосредоточено до 40 % золота и 10 % железа, связанные в основном с сульфидами железа. Полученные данные коррелируют с проведенными ранее исследованиями по морфологии золота в изучаемой руде коры выветривания [3].

Анализ гистограмм распределение золота, алюминия и кремния по формам нахождения и результатов РФА указывает на связь металла с глинистыми минералами. В жидкую фракцию из кристаллических форм переходит больше 50 % алюминия и кремния, до 20 % Al остается в кеке. Рентгенофазовый анализ твердой фракции, проводимый после каждого этапа выщелачивания, фиксирует наличие накрита ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), относящегося к кристаллической группе глинистых минералов. В условиях гипергенеза глинистые минералы являются концентраторами золота, за счет абсорбции в матрице цепочечных силикатов.

Основное количество титана находится в кристаллических оксидах и трудноразрушаемом кеке. Распределение железа и титана по формам обнаружения по этапам экстракции соответствуют литературным данным о поведении этих металлов в зоне гипергенеза и коррелируют с проведенными электронно-микроскопическими исследованиями

Минералогическими исследованиями в исходной руде не было обнаружено минералов серебра. По результатам изучения морфологии золотин, серебро присутствует в составе частиц золота [3]. Пробирный анализ исходной руды показал близкие содержания золота и серебра 2,8 и 2,0 г/т соответственно. В результате проведения геохимического анализа, содержание серебра составило 5,8 г/т, золота – 2,2 г/т (рис. 4). Относительно равномерно благородные элементы экстрагируются из органических форм и остается в кеке с сульфидной составляющей. В то же время, на первом этапе выщелачивания, где в жидкую фазу переходят более подвижные формы элементов, золота содержится больше чем серебра.

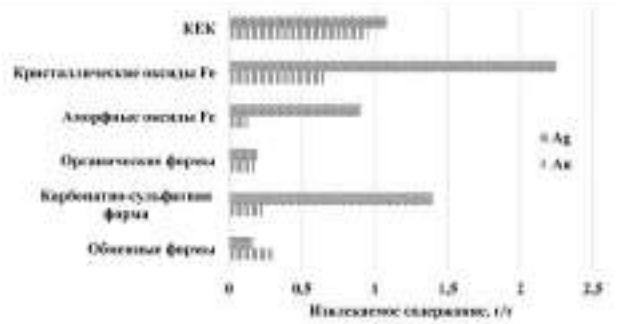


Рис. 4. Распределение золота и серебра по формам нахождения

Более активно Ag, чем Au экстрагируется в жидкую фракцию при растворении карбонатно-сульфатных форм, аморфных и кристаллических оксидов железа. При интерпретации результатов геохимического анализа по предложенной схеме, в отношении повышенного содержанию серебра, в обнаруженных формах, относительно определенного пробирной плавкой, необходимо учитывать переосаждение серебра хлорид ионом из реагентов на промежуточных стадиях.

Совместный анализ результатов последовательного выщелачивания и минералогических

исследований позволяют получить более детальную информацию не только о основных ценных компонентах, но и попутных, представляющих технологическую значимость.

Так, например, электронно-микроскопические исследования исходной руды, кроме золота показали наличие монацитов редкоземельных элементов (Ce, Nd, La). Обнаружены две формы проявления – тонкими корочками монацита по внутренней поверхности пористой структуры вторичных железосодержащих минералов (рис. 5) и компактными включениями (размером до 5–15 мкм) в плотных зернах сложной формы с неровными краями титансодержащих минералов.

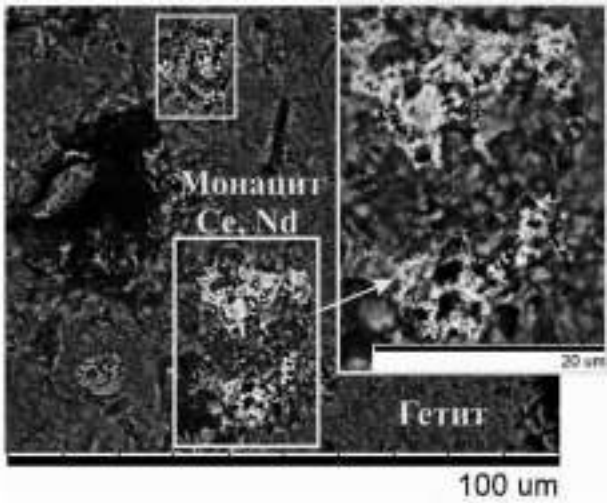


Рис. 5. СЭМ изображение редкоземельных элементов в исходной руде

По результатам геохимического анализа установлено, что основное количество редкоземельных элементов в изучаемом материале связано с кристаллическими оксидами железа и трудно разрушаемой силикатной матрицей кека, в котором также остается большая часть титана (рис. 6). В работах, проведенных ранее [4] на материале руд месторождения, сведений о наличии каких-либо редкоземельных элементов отмечено не было.

Таким образом, в результате проведения комплексных минералого-геохимических исследований исходной золотосодержащей руды получены развернутые сведения о взаимосвязях и формах обнаружения не только основного ценного компонента – золота, но и редкоземельных элементов в изучаемом сырье. По данным минералогического анализа установлено, что золото находится в руде как в свободном виде, так и в сростках с сульфидной и породообразующей составляющей. В результате геохимического анализа определена доля золота, связанная с обменными, карбонатными и органическими формами, подвижная в обводненных условиях, что может определять потери металла в технологических процессах при флотационном и при гравитационном обогащении. Для извлечения золота, обнаруженного в кристаллических, аморфных оксидах и труднорастворимой силикатной матрице в технологическом процессе требуется предварительное измельчение с последующим обогащением.

Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов по формам нахождения в исходной руде

При проведении исследований на обогатимость, в силу различных причин не всегда удается оперативно получить результаты пробирного, фазового анализа золота, технологам приходится «вслепую» разрабатывать схему исследований. В этих случаях применение методики последовательно геохимического выщелачивания, в качестве дополнительного метода изучения исходной руды и продуктов обогащения, дает возможность получить дополнительную информацию о взаимосвязях основных ценных компонентов и скоординировать направление работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Росляков Н. А Геохимия золота в зоне гипергенеза. – Новосибирск, издательство «Наука», 1981. 237 с.

2. Росляков Н. А., Нестеренко Г. В., Калинин Ю. А. и др. Золотносность кор выветривания Салаира. – Новосибирск: НИЦ ОИГГМ, 1995. – 170 с.

3. Усманова Н. Ф., Брагин В. И., Жижаев А. М., Меркулова Е. Н., Фищенко Ю. Ю. Морфологические разновидности золота в рудном и техногенном сырье коры выветривания // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2015, № 2. – С. 130–136.

4. Цыкин Р. А., Цыкин С. Р. Золотоносные коры выветривания и карстовые образования Енисейского кряжа // Геология и полезные ископаемые Красноярского края. Красноярск, КНИИГиМС, 1998. – С. 186–192.
5. Alvarez M. B., Quintas P. Y., Domini C. E. and etc. // Journal of Hazardous Materials 274 (2014). – p. p. 455–464.
6. Alvarez-Valero A. M., Saez R., Perez-Lopez R. // Journal of Geochemical Exploration 102 (2009). – p. p. 87–94.
7. Cappuyns V., Swennen R., Niclaes M. // Journal of Geochemical Exploration 93 (2007). – p. p. 78–90.
8. Davidson C. M., Graham J. Urquhart, F. Ajmone-Marsan and etc. //Analytica Chimica Acta 565 (2006). – p. p. 63–72.
9. Dold B. // Journal of Geochemical Exploration 80 (2003). – p. p. 55–68.
10. Elzinga E. J., Cirmo A. // Journal of Hazardous Materials 183 (2010). – p. p. 145–154.
11. Nemati K., Nor Kartini Aby Bakar, Abas M. R. and etc. // Journal of Hazardous Materials 192 (2011). – p. p. 402– 410.
12. Flores A. N., Sola F. M. . // Mine Water Environ 29 (2010). – p. p. 53–67.
13. Piatak N. M., Seal R. R., Sanzolone R. F., Lamothe Z. A. // http://pubs. usgs. gov/of/2006/1184
14. Ryana P. C., Hillier S., Wall A. J. // Science of the Total Environment 407 (2008). – p. p. 603–614.
15. Sundaray S. K., Nayak B. B., Lin S., Bhatta D. // Journal of Hazardous Materials 186 (2011). – p. p. 1837–1846.
16. Silveira M. L., Alleoni L. R. F., O'Connor G. A., Chang A. C. // Chemosphere 64 (2006). – p. p. 1929–1938.
17. Torres E., Auleda M. // Journal of Geochemical Exploration 128 (2013). – p. p. 35–41.

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НЕТРАДИЦИОННЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Ожогин Д. О.

ООО «ГРК», Москва, ozhogindenis@yandex.ru

Среди стратегических видов минерального сырья золото традиционно занимает лидирующее положение, поэтому вопросы расширения его минерально-сырьевой базы представляют практический интерес. В этой связи рассматривается целый комплекс полезных ископаемых. природного и техногенного происхождения, которые могут быть перспективными нетрадиционными источниками золота. В последние годы золото достаточно интенсивно добывается из комплексных колчеданных руд медной и медно-цинковой специализации. Сегодня практический интерес могут представлять руды коренных и россыпных месторождений, продукты их переработки, ранее не рассматривающиеся в качестве сырья на золота из-за его низкого содержания и тонкого размера. но благодаря современным технологиям, ставшими пригодными для попутного извлечения металла. Нетрадиционными рудами являются комплексные золото-редкометалльные, золото-платиноидно-редкометалльные продуктивные минерализации, присутствуюшие в золоторудных, золото-серебряных, платиноидных, золото-медно-порфировых и собственно редкометалльных месторождениях. В качестве потенциального источника золота рассматриваются железорудные месторождения (магматические, скарновые, метасоматические, осадочные, метаморфогенные и коры их выветривания), титано-магнетитовые и марганцевые руды, титано-циркониевые россыпи, фосфориты, бокситы, угли, песчано-гравийные отложения, строительные пески, железомарганцевые руды океана, техногенные образования [1].

Вовлечению нетрадиционных видов золотосодержащих полезных ископаемых в промышленную переработку предшествует минералогическое изучение, позволяющее выявить форму нахождения золота, ассоциирующие с ним минералы, в том числе и вредные, характер их взаимоотношения и гранулометрические характеристики. Именно эта информация становится базовой при создании современных технологий обогащения и передела труднообогатимого сырья, в том числе и нетрадиционного. Поэтому целесообразно разработать минералогические критерии оценки качества руд, учитывая их специфические особенности. Например, техногенное сырье всегда отличается от природного. При этом отходы добычи практически всегда отличаются от отходов переработки руд. Так в отходах добычи колчеданных руд самородное золото в боль-

шинстве своем имеет микро-нанометрическую размерность и может присутствовать как в индивидуализированных зернах, так и в срастании с сульфидными минералами. При этом в целом видовой минеральный состав отходов мало отличим от состава природной руды, аналогичная ситуация отмечается в текущих хвостах обогащения. В продуктах переработки руд, в первую очередь, шлаках, кеках золото может присутствовать как в самородном виде, так и в виде смеси интерметаллических соединений золота и серебра, ассоциирующих всегда с техногенными фазами. В тонкодисперсных оксидных рудах океана – железомарганцевых конкрециях и корках присутствуют гидратное золото, теллуриды золота и самородное золото в виде индивидуализированных зерен и агрегатов, размер которых не превышает 1 мкм, крайне неравномерно распределенных в железомарганцевом материале.

Разработка минералогических оценочных критериев золотосодержащих руд проблема достаточна сложная, требующая обобщения и систематизации значительного количества информации по различным минеральным объектам, выявления и изучения ассоциаций руд, типоморфных особенностей непосредственно золота и ассоциирующих с ним минералов, в первую очередь, рудных. Совершенно очевидно, что такие критерии не могут быть универсальными для руд разного типа и генезиса.

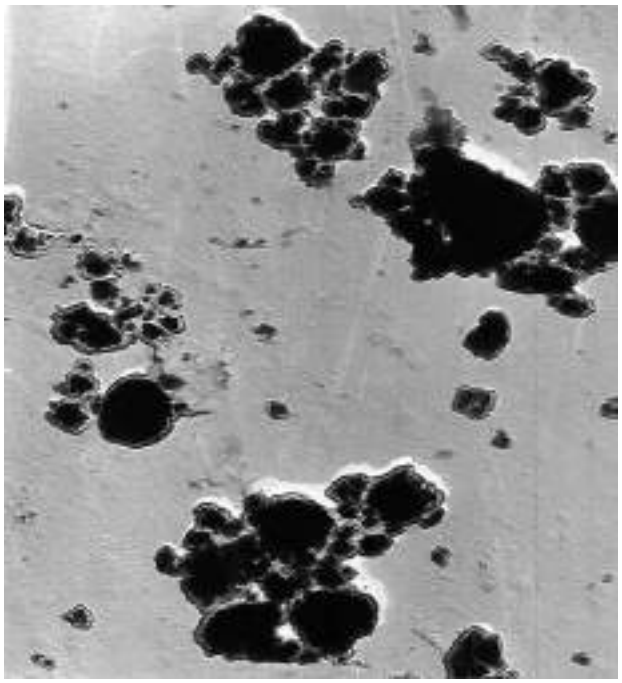
Интенсивное развитие приборной базы минералогических исследований, привлечение новых, нередко высокоразрешающих методов анализа, рациональное комплексирование методов изучение, позволяет сегодня получить новую информацию о полезных ископаемых. Например, выявить и изучить форму нахождения золота нанометрической размерности, и характер его локализации в других минералах или искусственных фазах (техногенное сырье), установить микро-наногетерогенность золотосодержащих фаз, влияющую на их физические (технологические) свойства. Все это в определенной степени способствует выявлению новых тенденций и закономерностей при оценке качества или отдельных технологических свойств нетрадиционных видов золотосодержащего минерального сырья, которые в дальнейшем могут получить статус оценочных минералогических критериев.

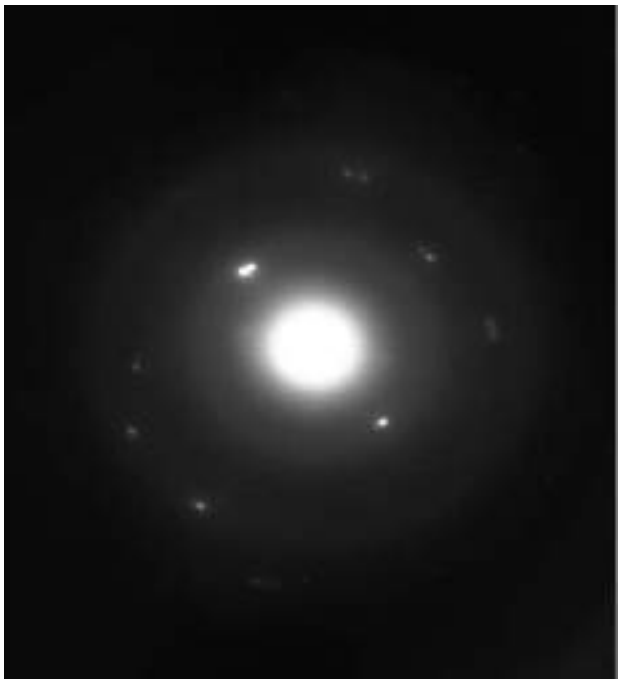
Основные критерии оценки качества руд базируются на максимально полной информации о вещественном составе руд. В качестве главных минералогических критериев следует считать: природные или техногенные золотосодержащие ассоциации, форму нахождения золота, ее гранулярный состав и характер распределения в сырье, особенности вмещающих золото минералов или искусственных фаз их физические свойства.

В качестве примера рассмотрим комплексные руды онежского типа карельских месторождений (Средняя Падма, Царевское, Космозеро, Весеннее, Шульгинское и др.). Уран-ванадиевые месторождения с благородными металлами, медью, молибденом и висмутом являются крупными рудными объектами не только по запасам ванадия, но и предположительно благородных металлов [2, 3]. Благороднометалльная минерализация, в том числе и золото, приурочена к приповерхностной и глубинной пластовой зонам окисления и гидротермальным роскоэлит-хромселадонит-доломитовым прожилкам, в которых содержание благородных металлов превышает 10 г/т. Уран-ванадиевые руды представлены различными минеральными типами, образующими достаточно четкую минералого-геохимическую зональность, выражающуюся в присутствии конкретных минеральных ассоциаций. В приповерхностной зоне окисления с низким содержанием благородных металлов самородное золото представлено сгустками размером менее 0,1 мкм (рис.).

В верхней части глубинной зоны окисления оно присутствует в виде веретенообразных зерен размером 2–3 мкм, подвергающихся разрушению. Около средней части глубинной зоны окисления кристаллы золота рассеяны в лейстах самородной меди, размер которых достигает десятков микрометров. В гидротермальных прожилках, секущих уран-ванадиевые руды, встречается не только самородное золото, но и селениды и теллуриды золота, ассоциирующие с оксидами (настуран и гидратированный настуран) и силикатами урана типа коффинита, ванадиевыми слюдами, сложными селенидами свинца, меди, висмута и др.

Минералогические особенности комплексных руд онежских месторождений (Южная Карелия), которые в данном случае можно рассматривать в качестве критериев оценки их качества, определяют невозможность извлечения благородных металлов методами глубокого обогащения.





Самородное золото в кварце. Приповерхностная зона окисления.
Микродифракционная картина. Реплика с извлечением. ПЭМ

ЛИТЕРАТУРА

1. Лущаков А. В., Быховский Л. З., Тигунов Л. П. Нетрадиционные источники попутного получения золота: проблемы и пути решения. Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. 2001. № 9. 82 с.
2. Черников А. А., Дубинчук В. Т., Ожогин Д. О. Чистякова Н. И. «Особенности распределения благородных металлов и форма их нахождения в зоне окисления уран-ванадиевых месторождений онежского типа в Ю. Карелии // Роль минералогии в познании процессов рудообразования. Материалы годичной сессии Московского отделения Российского минералогического общества. М. ИГЕМ РАН. 207. С. 330–335.
3. Chernikov A. A., Dubinchuk V. T., Ozhogin D. O., Chistyakova Y. I. Ftatures of occurrence and distribution of moble metals in the ores and oxidized zone of the Onega uranium-vanadium deposits, South Karelia // New Data on Minerals. 2007. Vol. 42. P. 43–49.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОЦЕНКИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ РУД

Быстров И. Г., Пирогов Б. И.

ФГБУ «ВИМС», г. Москва

Сегодня, в связи с неуклонным ростом доступности информационных технологий, математический аппарат становится незаменимым инструментом для решения основных задач научных и производственных исследований в геологии – открытию новых месторождений, вовлечению в промышленный оборот труднообогатимых и нетрадиционных типов руд в короткие сроки и с минимальными затратами.

Математический аппарат давно зарекомендовал себя как незаменимый инструмент для решения основных задач научных и производственных исследований в геологии. Одно из ведущих мест при анализе, обработке и представление пространственно-распределенной информации с помощью математических методов занимает геостатистика. Эта технология позволяет установить принципиальные особенности залегания

руд месторождений с учетом их химического состава, что способствует вовлечению в промышленное освоение месторождений в короткие сроки и с минимальными затратами.

В качестве объекта статистического анализа могут быть использованы любые установленные свойства изученных минералов и руд (физические параметры, химический состав и др.). Определяющим является последовательность математической обработки с соблюдением иерархии по уровням минералогенетической системы: индивид (кристалл, зерно, частица) → агрегат (микроагрегат) → минеральная ассоциация (взаимоотношения и саморегулирование рудной и нерудной составляющей) → руда (рудное тело) → месторождение (зональность). Также при использовании метода для решения задач геологической направленности немаловажно учитывать пространственно-распределенную (или пространственно-временную) информацию.

Однако в определенной «погоне» за минимизацией затрат и «упрощению» представлений о структуре месторождения, исследователи упускают из виду, принципиальную взаимосвязь химического состава руд с онтогеническими изменениями в физико-химическом состоянии минералогенетической системы. Пренебрежение этим принципом, являющимся одним из определяющих как при геолого-технологическом картировании месторождений, так и при минералого-технологическом исследовании руд, может привести к получению результатов, не отвечающих действительности.

Исследователи порой не уделяют особого внимания комплексному подходу, сущность которого Н. М. Федоровский образно описывал так: «Для того чтобы определить промышленную ценность какого-либо месторождения мало еще его разведать, мало установить запасы. Сама по себе мощность месторождения не определяет еще ни его ценности, ни его пригодности к промышленной переработке. Чтобы установить такую его пригодность, надо одновременно изучить качественные его показатели, как с точки зрения физико-химических свойств, так и технологии самого полезного ископаемого, возможности обогащения, методов добычи и переработки с подведением соответствующих экономических обоснований. Таким образом, для «познания» месторождений, должен быть проведен определенный цикл исследований, где одновременно должны участвовать и геологи, и минералоги, и петрографы, и физики, и химики, и технологи, и обогатители, и экономисты. Только при таком комплексном исследовании минерального сырья можно говорить о его действительно всестороннем изучении, дающем правильную промышленную оценку».

Построение моделей чрезвычайно важно и актуально, но должно опираться не на валовый химический состав руд, а на глубокие комплексные минералого-аналитические исследования минерального сырья на основе онтогенического подхода. При этом важно определить не только абсолютные значения важнейших параметров руд, но и взаимосвязи между ними, зачастую «скрытые» за относительными значениями или устоявшимися в исследовательской среде принципами. Только установление отношений между определенными физическими, физико-химическими, химическими, пространственными и временными переменными позволит согласовать принципы оногенического подхода и поиска технологических решений для вовлечения в промышленную переработку труднообогатимых руд и нетрадиционных видов сырья. Существенную помощь в этом может оказать статистическая обработка аналитических данных.

Так, в ходе работ по комплексной геолого-экономической и минералого-технологической оценке месторождений Качканарской группы, которую составляют Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения титаномагнетитовых руд, сотрудниками ФГБУ «ВИМС» было отмечено, что, несмотря на пространственную и генетическую близость рассматриваемых объектов, изменчивость основных свойств оруденения в их пределах весьма различна [3,4]. Месторождения, хоть и приурочены к одному габбро-пироксенитовому массиву, имеют ряд существенных отличий друг от друга, влияющих на методику разведки и минералого-технологические особенности их руд, что связано с индивидуальностью развития магматогенных и метасоматических процессов минералообразования на каждом из них [3].

При сравнении данных минерального состава руд обоих месторождений было установлено, что по содержанию основных минералов они достаточно близки. В то же время несущественно различаются по содержаниям и соотношению компонентов клинопироксены в пробах руд обоих месторождений; наиболее существенны различия в амфиболах, хлоритах, гра-

натах как по содержаниям, так и по распределению основных компонентов в пробах.

На Гусевогорском месторождении титаномагнетит отличается по средним характеристикам: более высоким содержанием Fe и пониженным V, TiO_2, также заметны различия в содержаниях тех же компонентов в ильмените и шпинели в целом в сторону повышения по всем компонентам, а для шпинели характерно также повышенное абсолютное содержание в пробе. Во многом это связано с влиянием указанных факторов на морфоструктурные особенности титаномагнетита (рис. 1).

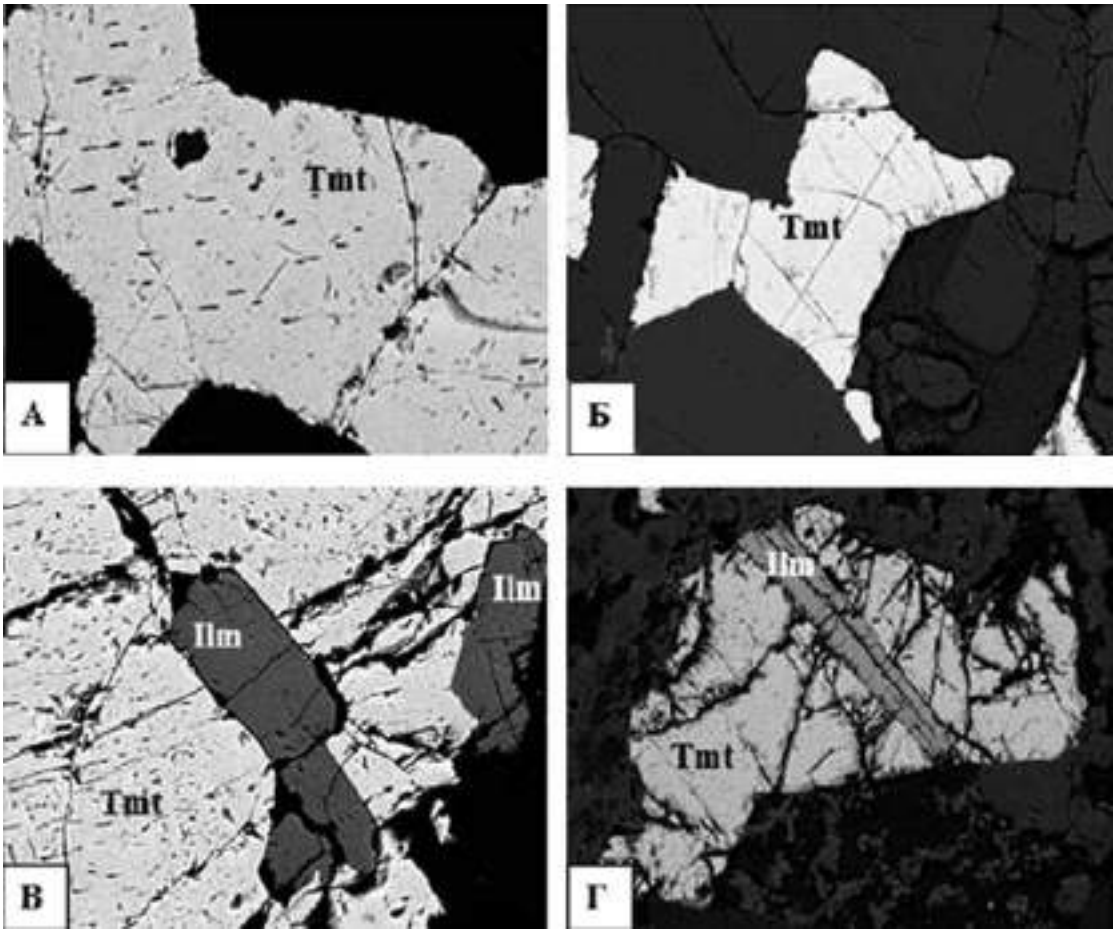


Рис. 1. Морфоструктурные особенности титаномагнетита

Отличительной особенностью титаномагнетита Гусевогорского месторождения является наличие сосуществующих с ним довольно крупных (до 100 μм) зерен ильменита, что обусловлено более полным разделением продуктов распада твердого раствора, за счет различной природы первичных и вторичных этапов минералообразования. Именно это, в итоге, обуславливает более высокие содержания Fe в минерале Гусевогорского месторождения. Нераскристаллизовавшиеся минальные составляющие обедняют минерал в Fe за счет увеличения доли Ti.

В конечном итоге, отмеченные особенности в различиях минерального состава руд Гусевогорского месторождения по сравнению с рудами Собственно-Качканарского месторождения обусловлены тем, что месторождения приурочены к различным петрографическим зонам, а также определенными различиями в проявлении вторичных наложенных процессов – амфиболитизации, хлоритизации, развития гранатов, серпентинов, сапонита, эпидота и других минералов именно на Гусевогорском месторождении.

Методами геостатистики и вариационной статистики с учетом данных комплексного минералого-технологического изучения Селивановым Д. А. с коллегами [3, 4] была доказана принадлежность Собственно-Качканарского месторождения к первой группе по сложности геологического строения, а Гусевогорского – ко второй группе, определена оптимальная плотность сети разведочных скважин, дан прогноз по улучшению количественных техноло-

гических показателей Качканарского горно-обогатительного комбината при введении в эксплуатацию Собственно-Качканарского месторождения.

Принципиальное понимание вопросов, касающихся как генетических, так и минералого-технологических особенностей руд месторождений, значительно повышается за счет установления взаимосвязей между отдельными компонентами, в первую очередь между химическими элементами, слагающими минеральные индивиды, агрегаты, и, впоследствии, руды.

Для решения таких определяющих вопросов при оценке руд Пудожгорского месторождения (Республика Карелия) нами были установлены взаимосвязи между отдельными компонентами, в первую очередь химическими элементами, слагающими минеральные индивиды, агрегаты, и руды в целом. Для выявления этих связей была проведена обработка методами математической статистики (корреляционный, факторный и др. анализы) данных об элементном составе Пудожгорского интрузива в сравнении с данными о химическом составе магнетита (титаномагнетита), являющегося главным промышленно-важным минералом руд месторождения. Результаты проведенных исследований отображены в работе [1]. Благодаря им было доказано, что определяющее влияние на минералого-технологические особенности Ti-V-содержащих железных руд магматического генезисах, оказывают взаимоотношения титаномагнетита и нерудных минералов в различных ассоциациях, существенную роль, в развитии которых играет самоорганизация системы «минерал-среда».

Так, оценка корреляционной матрицы элементного состава титаномагнетитов рудного тела в целом (данные РСМА) по критерию Фишера позволила нам выявить обратные связи между Ti – Fe (r = – 0,97), Ti – V (r = –0,63) и прямую связь между V – Fe (r = 0,69), а также средние связи Ti – Si (r = 0,38), Ti – Ca (r = 0,35) и сильная прямая связь Mn – Ti (r = 0,92), при этом между элементами, отнесенными в разные группы, наблюдается сильная обратная связь. Вероятнее всего, это связано с понижением общего содержания Fe в минерале вследствие выделения как продукта РТР ильменита с его последующим переходом в титанит. Прямая корреляционная связь Fe-V явно указывает на вхождение V в виде изоморфной примеси в магнетит, а также на наличие собственной Fe-V фазы – кульсонита, диагностируемого в единичных наблюдениях. Интересна также слабая обратная связь K с Fe-Ti-V (r ≈–0,30) при такой же прямой с Si и чуть меньшей с Al (r = 0,25), которая указывает на потерю ценных компонентов титаномагнетитом при образовании слюд.

Факторный анализ, проведенный по данным химического состава образцов титаномагнетита, отобранных с разных глубин рудной залежи, позволил выделить изменения, происходившие с рудным минералом по всей глубине интрузива. При рассмотрении веса факторов (рис. 2) видно, что в процессе формирования элементного состава титаномагнетита участвуют 3 фактора, несущих более 82 % общей дисперсии.

Величины собственных параметров и веса факторов показывают, что значения исследуемых характеристик титаномагнетита определяются преимущественно на 40,1 % действием одного фактора F1. Анализ структуры признаков фактора F1 показывает, что нагрузка этого фактора заключается в значительном понижении содержания Fe и V в минерале, под влиянием и Mn и Ti и в меньшей степени Ca и Si. Такой набор признаков и характер их действия позволяет предполагать, что фактор F1 отражает процесс выделения собственных фаз из прототитаномагнетита, содержащего магнетит с примесями ильменита, титанита, ульвита и др.

Фактор F2 несет в себе 28,6 % информации о рассматриваемом минерале. Анализ признаковых нагрузок этого фактора показывает, что онимеет значимую положительную связь с Si, Al и Mg и слабые отрицательные связи с Fe и V. Такая признаковая структура фактора F2 позволяет предполагать, что он отражает влияние на состав титаномагнетита включений первичного магниевого алюмосиликата, захваченного магмой в процессе кристаллизации, а также влиянием на минерал более позднего магниевого алюмосиликата, с частичным замещением железа на магний в процессе автометасоматоза, и, вероятно, диффузионной миграцией железа.

Фактор F3 несет в себе небольшую долю информации (13,6 %). Его интерпретация позволяет предположить, что F3 отражает взаимный метасоматический процесс изменения состава титаномагнетита и сопутствующих ему Ca- и Na-плагиоклазов вмещающей породы и в меньшей степени влияние K входящего в состав развивающихся по захваченным амфиболам и алюмосиликатам слюд.

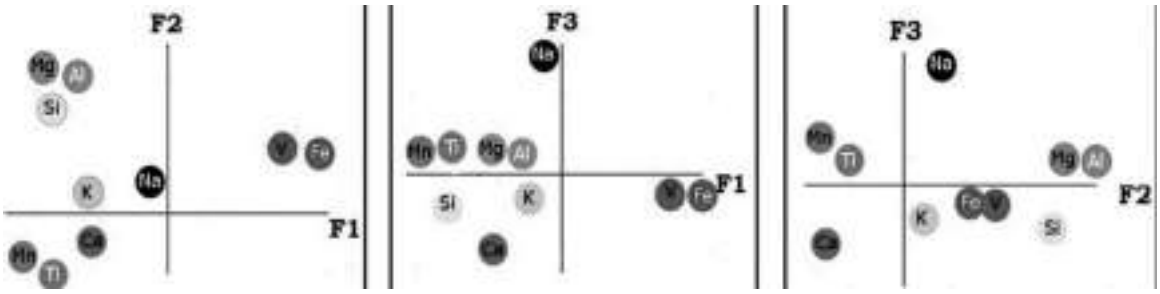


Рис. 2. Факторный анализ по данным химического состава образцов титаномагнетита

Установленные с помощью статистической обработки механизмы перераспределения рудообразующих компонентов с учетом данных полученных методом РСМА позволяют сделать следующие выводы:

Значение на перераспределение основных компонентов руд (Fe, Ti, V), совместно поступающих во вмещающую породу в результате магматогенной стадии, имеют вторичные процессы минералообразования. В результате метасоматических изменений происходит выделение титана в виде собственных минералов на базе титаномагнетитовой матрицы. При этом из минерала-хозяина также выносятся элементы – примеси магния и марганца. Ванадий и железо при наложенных процессах не теряют прямой взаимосвязи.

В рудах месторождения между характерными ассоциациями силикатных минералов и титаномагнетитами различного уровня титанистости присутствует четкая взаимосвязь.

Установленные зависимости свидетельствует о закономерностях появления различных ассоциаций силикатов в связи с эволюцией состава титаномагнетита. Эти же представления подтверждаются характером взаимоотношений силикатов и ильменита с титаномагнетитами различного уровня титанистости в рудах, предопределяя в целом изменчивость качества рудных и нерудных минералов.

Полученные путем статистической обработки материалы в сочетании с данными по элементному составу не только дополняют генетическую картину процессов рудообразования, в том числе с учетом глубины метаморфических преобразований, но позволяют также судить об особенностях поведения минералов в связи с рудообогащением. В первую очередь, это определяет существенные потери (по сравнению с валовым содержанием) Fe и в меньшей степени Ti и V в минералах магматической стадии, перешедших в результате метаморфизма и автометосоматоза в представителей более поздней нерудной минерализации (титанит, амфиболы и др.).

Возможности применения статистических методов для решения задач технологическиой минералогии широко освещено в работе [2]. С помощью математического аппарата исследователи оценивают количественные соотношения химических компонентов в рудах, безусловно, служащие основой для разработки минералого-технологической классификации. Кроме того, статистические данные позволяют проверить достоверность критериев разделения руд на сорта и разновидности. Так, факторный анализ (рис. 3), проведенный по данным химического состава для основных элементов в рудах и породах Ковдорского месторождения (Мурманская область) показал, что фосфор и железо не коррелируют с другими компонентами.

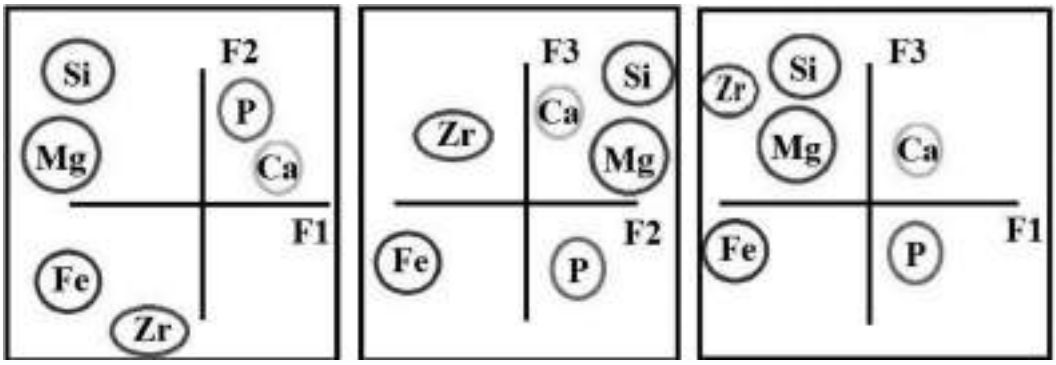


Рис. 3. Факторный анализ по данным химического состава для основных элементов в рудах и породах Ковдорского месторождения

Это указывает на некоторую обособленность процессов, связанных с появлением P_2O_5 и Fe на месторождении и значительно осложняет их использование в качестве определяющих признаков при классификации руд. На диаграммах можно выделить лишь две постоянные группы переменных: MgO-SiO_2 и CO_2–Nb_2O. Первая определяется вхождением обоих компонентов преимущественно в состав форстерита, вторая указывает на связь редкометалльной минерализации с процессом карбонатизации. Также обращает на себя внимание постоянный антагонизм геохимической специализации триады Fe-P_2O_5–CO_2, как компонентов трех геологических процессов. Необходим глубокий подход на онтогенической основе к оценке минерального сырья, который позволит не только учесть эти взаимосвязи и проследить динамику изменения минерального состава руд, но и оценить их влияние на результаты сепарации, флотации и гравитационного обогащения различных участков месторождения.

Результаты факторного анализа, осуществленного с целью проверки достоверности критериев разделения руд на сорта и разновидности, приведены на рис. 4. В качестве переменных служили содержания основных компонентов, входящих в состав руд. Точки на диаграммах отвечают объектам (отдельным технологическим пробам).

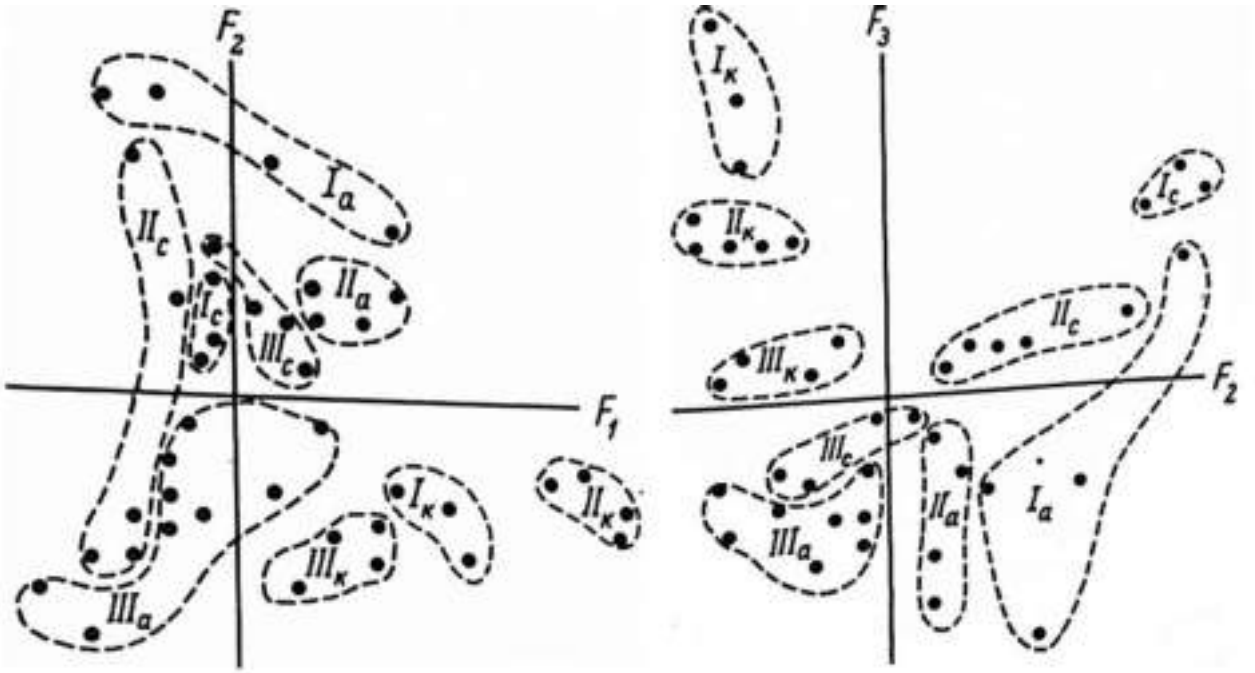


Рис. 4. Достоверность критериев разделения руд на сорта и разновидности по результатам факторного анализа

Как видно из рис. 4, руды, относящиеся к одним сортам и разновидностям, образуют отдельные, индивидуальные группы точек. Это указывает на их внутреннюю близость по значениям факторов – признак подобия условий образования и подтверждает высокую корректность установленных исследователями ранее величин морфологических, химических, физических и эволюционных величин для выделения технологических сортов и типов руд.

Полученные зависимости с учетом данных по морфологии, составу, свойствам и эволюции магнетита, в частности, и руд, в целом, на основе онтогенического подхода не только дополнили генетическую картину процессов рудообразования, позволяя проследить глубину метаморфических изменений, но также и судить об особенностях поведения минералов при обогащении руд.

Таким образом, использование различных методов математической геологии и минералогии на разных уровнях исследования вещества помогает составить более полную картину условий образования и эволюции вещества. Это позволяет дать прогнозную оценку минералого-технологических особенностей руд. Однако не следует забывать, что достоверность полученных статистических результатов может быть обеспечена лишь при комплексном минералого-аналитическом изучении вещества, основанном на онтогеническом подходе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров И. Г., Пирогов Б. И., Якушина О. А. Морфоструктурные и конституционные особенности титаномагнетита железных руд Пудожгорского месторождения. Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 546–572.
2. Пирогов Б. И. Поротов Г. С., Холошин И. В., Тарасенко В. Н. Технологическая минералогия железных руд. – Л.: Наука, 1988. – 304 с.
3. Селиванов Д. А., Быстров И. Г. Результаты комплексной геолого-экономической оценки месторождений Качканарской группы // Разведка и охрана недр. 2015. № 3 С. 46–52.
4. Селиванов Д. А., Быховский Л. З., Емельянов С. А. Оценка группы сложности геологического строения месторождений Качканарской группы по количественным показателям. // Разведка и охрана недр. 2014. № 1. С. 59–64.

МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД МИКРОСКОПОМ: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА

Войтеховский Ю. Л.

ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты, woyt@geoksc.apatity.ru

28 сентября 2016 г. в НПК «Механобр-Техника» в Санкт-Петербурге под эгидой Комиссии по технологической минералогии РМО состоялся XI Российский семинар «Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии». Состояния дел с модальным анализом горных пород под микроскопом, в том числе активная реклама дорогостоящих оптических (соединенных с компьютером) анализаторов структур горных пород и руд, побуждает снова обратиться к фундаментальным проблемам метода. В этой статье коротко обсуждаются истоки модального анализа горных пород под микроскопом, его математические основания и перспективы.

Заметим, что проблема восстановления характеристик объекта по наблюдениям в пространствах меньшей размерности – не только общенаучная, но и общекультурная. «На свете есть многое, из чего нам дано ровно столько, сколько необходимо, чтобы мы догадались: это, по сути, надежно укрыто от наших глаз. Чтобы это понять, не надо прибегать к каким-то высоким абстракциям. Все, чему свойственна глубина, имеет единую основу. Так, материальные предметы, которые мы можем явственно наблюдать, осязать, обладают третьим измерением, иначе говоря, глубиной, неким внутренним пространством. Но как раз это третье измерение – и невидимо, и неосязаемо. Конечно, на поверхности подобных предметов мы можем распознать кое-какие слабые, робкие намеки на то, что находится внутри, но это «внутри» никогда не сможет выбраться наружу, стать явным точно в такой же мере, как чисто внешние стороны предметов. Напрасный труд – пытаться нарезать третье измерение на тонкие слои поверхностей. Как бы тонко мы ни резали – слои всегда будут сохранять некоторую толщину, иначе говоря, глубину, невидимое, неосязаемое внутреннее пространство. Если же мы получим абсолютно прозрачные для взгляда – мы простонапросто вообще перестанем видеть что бы то ни было и не заметим ни глубины, ни поверхности. Перед нами предстанет прозрачность как таковая, или ничто. Ибо если глубина нуждается в поверхности, за которой можно было бы укрыться, спрятаться, то и поверхность, в свою очередь, также нуждается в глубине, чтобы можно было над чем-либо простираться, что-либо собой прикрывать» [12].

Знание модального состава горной породы или руды весьма важно для решения петрологических и минералого-технологических вопросов. Некогда велись весьма ожесточенные дискуссии о том, какие виды анализа (геометрические под микроскопом или количественно-минералогические с дроблением горной породы и разделением фаз комплексом методов) быстрее ведут к цели и дают более точный результат [15]. Истина оказалась посередине – у каждого подхода нашлись достоинства и недостатки общего порядка и, в особенности, применительно к конкретным горным породам и рудам с их огромным диапазоном составов и структурно-текстурных характеристик.

Сегодня модальный анализ горных пород под микроскопом выполняется с помощью анализаторов изображений, в состав которых входят компьютерные системы. Это Magiscan, Quantimet, Videolab, System III, Vids II (Великобритания), Videoplan, IBAS, Leitz TAS Plus (ФРГ), Omnimet (ФРГ-США), Pericolor (Франция), Omega (Польша), Robotron (ГДР) и др. Отечественные производители поставляли анализаторы: Свит (ИКИ РАН – Дезинтегратор), Video-Master (ООО "НВП Центр ЭСТАгео") и МИУ-5м (ЛОМО ЦКБ). Список создает иллюзию благополучия и прогресса. Но в рассматриваемом аспекте ситуация мало изменилась со времени создания метода. Имеющиеся системы позволяют охарактеризовать изображение различными параметрами, мгновенно выполнить сложные математические пересчеты и вывести результаты на печать. Но фундаментальный вопрос состоит в том, насколько характеристики 2D или 1D сечений минеральных зерен соответствуют искомым 3D характеристикам зерен для произвольной горной породы (рис. 1)?

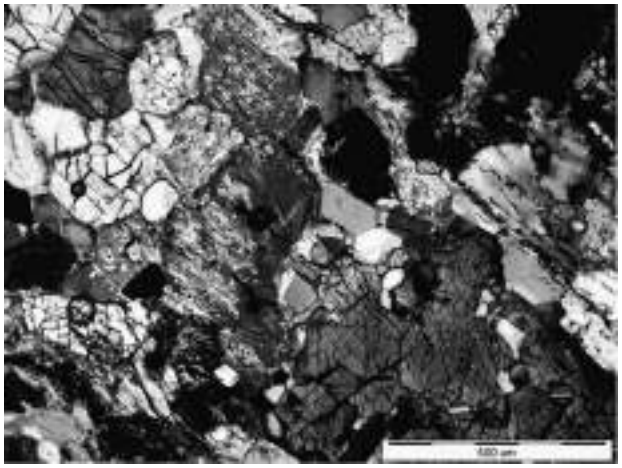


Рис. 1. Сечение горной породы (петрографический тип не важен). В какой мере метрические параметры сечений отвечают таковым самих зерен?

В методе Делесса [18] утверждается, что объемные доли n породообразующих фаз равны их площадным долям в плоских сечениях, измеренным так или иначе: dV_1: dV_2: …: dV_n = dS_1: dS_2: …: dS_n. Делесс опробовал свой метод на макроскопических образцах, Солла (Sollas W. J., 1887–1892) – на зарисовках петрографических шлифов, Джоли (Joly J., 1903–1905) – на микрофотографиях. Обоснование метода выполнено в целом корректно. Делесс рассуждал так. Пусть образец горной породы соотнесен с прямоугольной декартовой системой координат XYZ. Обозначим p(z) площадь некоторой минеральной фазы в плоскости, непрерывно скользящей вдоль Z. Тогда объем фазы в образце равен: $V = \int p(z)\,dz$. Площадь p(z) заключена между минимумом m и максимумом M. Поэтому $mZ < V < MZ$, где Z – высота образца. Когда p(z) = const = p, объем фазы в образце равен pZ – объему цилиндра с основанием p и высотой Z. Это верно для любой фазы, из чего следует приведенное соотношение, означающее, что отношение объемов цилиндров с равными высотами равно отношению площадей их оснований. Итак, главное условие, на котором стоит метод, p(z) = const. По Делессу, оно должно соблюдаться для "достаточно больших" сечений образца тем точнее, чем равномернее фаза распределена в горной породе.

Легко видеть, что на практике эти условия не соблюдаются. Варьирующие в широком диапазоне площадные доли минеральных фаз обычно суммируются для "достаточно большого" числа шлифов (разных по площади и потому имеющих разный вес в совокупности) и принимаются за объемные доли. Эта процедура не имеет отношения к методу Делесса ни в случае, когда каждый новый шлиф принимается за последовательное сечение образца, скользящее вдоль Z, ни когда все шлифы в совокупности представляются его единым сечением. На практике p(z) ≠ const. Влияние этого на точность метода изучалось многими авторами уже на заре его применения [4, 21].

Акер (A. Hacquert. Modification de l'appareil de Shand et son employ dans l'analyse mineralogique quantitative des roches meubles. Liege, 1929. Цит. по [5, с. 15–16]) обосновал метод Делесса ссылкой на принцип Кавальери. В работе "Geometria Indivisibilium continuorum nova quadam ratione promota" (1635) (Геометрия, изложенная новым способом при помощи неделимых непрерывного. М.-Л.: Гостехиздат, 1940. Цит. по [11]) Кавальери развил "метод неделимых" определения площадей и объемов. Неделимыми он назвал параллельные хорды 2D фигуры или плоские сечения 3D фигуры и ввел понятие "суммы всех неделимых" внутри контура фигуры, ставшее зародышевой формой определенного интеграла. Принцип Кавальери формулируется так: *если при пересечении двух тел плоскостью, параллельной некоторой ранее заданной плоскости, получаются сечения равной площади, то объемы тел равны между собой*. Это положение (и аналогичное ему для 2D фигур) было известно древнегреческим математикам. Строго говоря, Кавальери его доказывает, а не принимает как принцип. Его труды сыграли большую роль в раз-

витии интегрального исчисления. Но в целом оно пошло по пути разложения величины на элементарные части того же измерения. Неправильный шаг Кавальери состоял в рассмотрении 2D фигуры как суммы *конечного числа* узких прямоугольных полосок, а 3D фигуры как суммы *конечного числа* цилиндрических пластинок вместо рассмотрения их как *пределов* указанных сумм [6, 8, 13, 22].

Поныне встречаются рассуждения, повторяющие историческую ошибку Кавальери: “Поскольку петрографический шлиф весьма тонок, то различием сечений минерального зерна на его двух сторонах можно пренебречь. Тогда объем зерна в теле шлифа определится как объем цилиндра с высотой, равной толщине шлифа, а отношения объемов нескольких зерен – как отношения площадей оснований, то есть сечений, что и требовалось доказать. А если это верно для одного шлифа, то верно и для других…” Суть софизма кроется в мелочах, которыми предлагается пренебречь. Действительно, *конечная сумма бесконечно малых величин* тоже бесконечно мала. Но объем тела есть интеграл, то есть общий предел верхней и нижней сумм Дарбу, которые суть *суммы бесконечно большого числа бесконечно малых величин* – ими пренебречь нельзя.

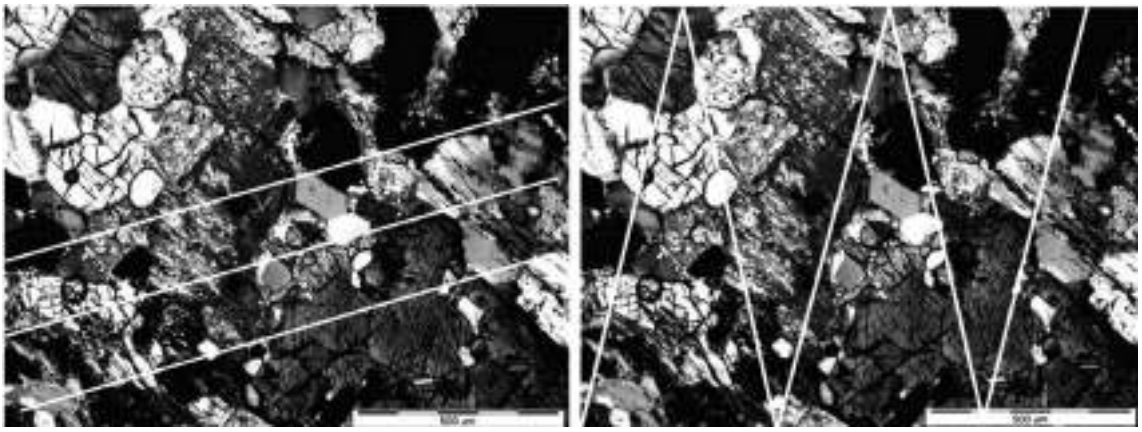


Рис. 2. Параллельная (А) и пилообразная (Б) индикатрисы

Через 50 лет после Делесса, Розиваль повторил его рассуждение, понизив на 1 размерность пространства. “В соответствии с принципом Делесса, объем содержащихся в породе составных частей сведен к площади их сечений. Но в соответствии с простыми фундаментальными положениями аналитической геометрии она может быть далее определена с помощью простой суммы длин, если исходить из тех же соображений, которые руководили Делессом, когда он предпринял редукцию объемного отношения к площадному. Итак, мы видим, что в методе Делесса в качестве подлежащего измерению элемента тела фактически служит материальная поверхность, очень малая толщина dz которой может считаться постоянной. Такую материальную поверхность представляет собой всякий прозрачный шлиф, если он был изготовлен столь тонким, что все подлежащие измерению составные части породы фактически пересекаются его двумя, лишь на несколько сотых долей миллиметра отстоящими друг от друга параллельными плоскостями. Вместо этой материальной поверхности в качестве подлежащего измерению элемента я теперь беру материальную линию, поперечный размер которой теоретически выражается бесконечно малой величиной dydz, которую следует рассматривать постоянной и конечные отрезки которой x_1, x_2, x_3 … дают нам меру относительного количества минеральных компонентов в породе. Таким образом, вместо породного листа Делесса появляется породная нить, в высшей степени тонкая призма, приблизительно сравнимая с чрезвычайно тонким керном скважины, подобно измеряющему зонду пронзающая породу и в линейных долях ее составных частей сообщающая нам об их объемных долях в самой породе.

Эту измерительную материальную линию, состоящую из отдельных однородных отрезков внутри пересекаемых минеральных зерен, я называю количественной индикатрисой. В отношении суммы длин сечений, приходящихся на определенный минерал, к ее общей длине одновременно выражается и объемная доля минерала в породе, при этом расчет отношения редуцируется из третьего измерения прямо в первое” [20, здесь и далее пер. автора].

К к методу Розиваля следует сделать те же замечания, что и к методу Делесса. Но важная особенность его работы – попытка разобраться в ха-

рактере индикатрисы. Им сделана важная оговорка, что индикатриса не обязана быть серией параллельных равноотстоящих линий (рис. 2, слева), но может иметь вид пилообразных (рис. 2, справа) или даже хаотических (рис. 3, слева) кривых, равномерно покрывающих плоскость шлифа. Последние два вида индикатрис не реализованы в современных анализаторах структур. Следующее рассуждение показывает, как Розиваль оценивал суммарную длину индикатрисы для достижения требуемой точности измерения. “Нетрудно адаптировать метод для микроскопических исследований, при этом следует предусмотреть лишь некоторые правила предосторожности, понятные микроскопистам сами собой.

Если в прозрачных шлифах нужно изучить грубозернистую породу, то следует обратить внимание на то, что одного шлифа нормального размера (около 2×2 см) для точного расчета соотношения ее составных частей обычно мало. Для измерения с точностью в 1 % размер зерна в 5 мм требует длины индикатрисы по крайней мере в 500 мм. Расстояние между двумя соседними отрезками системы индикатрис в любом случае должно быть не менее размера зерна, иначе в расчет дважды попадут те же самые индивиды, чего следует избегать. Размер шлифа в этом случае допускает только систему индикатрис из 4×4, в лучшем случае 5×5 линейных пересечений по 2 см, то есть от 320 до 500 мм суммарной длины, что находится на пределе требуемой точности и представляется недостаточным. Поэтому здесь необходимо измерение второго шлифа и желательно – третьего для контроля за равномерностью распределения составных частей.

Но для характеристики однородной мелкозернистой породы одного шлифа уже достаточно, так как число возможных линий индикатрисы с уменьшением размера зерен возрастает и, например, для зерен в 1 мм в нормальном шлифе помещается сеть из 20×20=400 сечений по 20 мм длиной, итого в целом 8000 мм, в то время как точность измерения в 1 % требует индикатрисы длиной лишь в 100 мм. В этом случае для измерения достаточно 5–6 линий по 20 мм, произвольно расположенных на площади шлифа. При еще меньшем размере зерен требуемая длина линии уменьшается еще более” [20, с. 162–163].

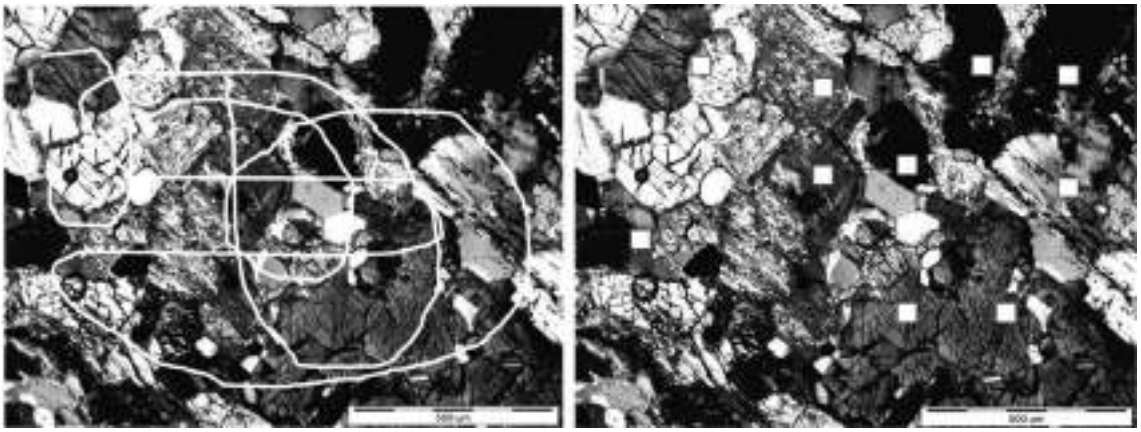


Рис. 3. Хаотическая индикатриса по Розивалю (А) и точечный метод по Глаголеву (Б)

Следующий концептуальный шаг в развитии метода сделал А. А. Глаголев. По сути, он снова уменьшил на 1 размерность пространства, превратив индикатрису Розиваля в систему точек. “Точечный метод заключается в том, что в некотором плоском сечении анализируемой горной породы распределяют большое число точек и затем подсчитывают, какое число точек из общего числа попало на зерна каждого из компонентов горной породы. Под словом “равномерно” подразумевается такое распределение точек, при котором вероятно попадание одинакового числа точек в одинаковые по размерам части пространства, где бы они не находились, или, иначе, такое распределение, при котором не было бы закономерного сгущения или разрежения точек. Равномерное (в этом статистическом смысле) распределение точек в сечении породы не противоречит их беспорядочному расположению” [5, с. 78] (рис. 3, справа).

Показателен интерес А. А. Глаголева к вопросам точности оценок модального состава горной породы под микроскопом всеми тремя методами. “Автор вполне сознает недостаточную полноту своей работы и слабость ее математической обработки, в особенности раздела “Влияние струк-

туры”…” [4, с. 5]. “Точность в определении состава породы определяется числом обсчитанных зерен. То есть, если в шлифе есть всего n зерен, то точность в определении состава породы соответствует числу n. Главное – зацепить все зерна, то есть проводить линии сканирования на расстоянии среднего поперечника зерна. Если же проводить линии чаще, то мы увеличим точность определения состава шлифа, но ответ будет равновероятен с предыдущим и определяться тем же n. В. Н. Лодочников и В. А. Николаев как раз и путали одно и второе, рекомендуя сгущать линии” [4, с. 22]. “Поскольку точность определения состава породы соответствует числу зерен, то при числе точек, равном числу зерен, точечный метод достигает максимальной возможной точности, и линейный и плоскостной методы не могут ничего добавить” [4, с. 29]. По-видимому, А. А. Глаголев был первым из российских авторов, кто разработал формулы для определения погрешностей метода Делесса-Розиваля-Глаголева при анализе горных пород с различными структурами.

По-видимому, первым в России за решение стереологических задач взялся А. М. Журавский. “Работа проф. А. М. Журавского является новой формой приложения метода исчисления вероятностей к задаче определения минералогического строения ископаемых по данным микроскопического анализа шлифов. Эта задача имеет огромное значение как для механической или химической обработки ископаемых, так и для познания их генезиса и свойств… Возникает вопрос, в какой мере изучение шлифа, измерение содержания компонента и размера зерен по шлифу или ряду шлифов дают право судить об истинном содержании в породе компонентов, истинном размере зерен и расстоянии между ними. Шлиф есть случайный плоский разрез породы. Поэтому представляется естественным приложить к изучению поставленного вопроса, к оценке результатов измерений по шлифам методы изучения случайных явлений, т. е. обратиться к исчислению вероятностей” [7, с. 3–5].

Рассмотрение современных результатов стереологического анализа требует отдельной статьи. Укажем лишь те источники, в которых исследована и адаптирована к задачам петрографии и технологической минералогии проблема стереологической реконструкции распределений размеров сферических и квазисферических (эллипсоидальных) частиц по наблюдениям в шлифах (аншлифах) [2, 3, 9, 10, 14, 16, 17, 19, 23, 24]. Пример использования результатов дан на рис. 4–7 [2, 3]. Распределение размеров 2D сечений даже для стандартной частицы (условный R=100) выглядит трудно предсказуемым образом: размеры сечений распределены между min=0 и max=100, причем доля больших сечений завышена по сравнению с малыми из-за особенностей сферической формы (рис. 4, № 1). Это сплошь и рядом не учитывается в модальном анализе для целей технологической минералогии. В еще меньшей мере 3D ситуация распознаваема по 2D наблюдениям для урезанных (рис. 5), азорванных (рис. 6) и совмещенных (рис. 7) распределений размеров частиц.

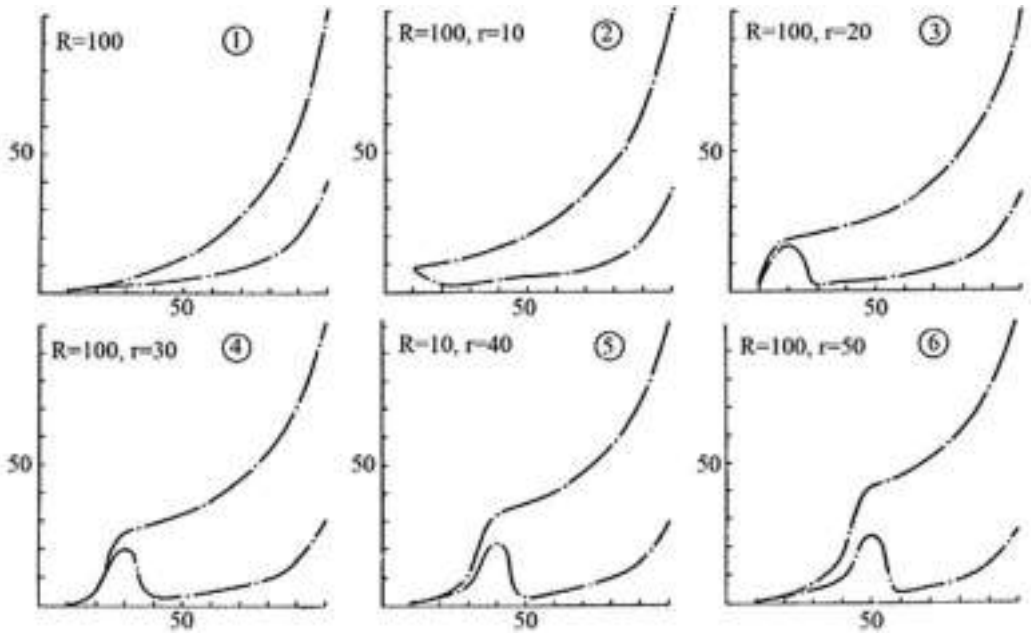


Рис. 4. Частотные и кумулятивные распределения размеров сечений для разных истинных размеров сферических частиц. № 1: частицы одного размера, № № 2–6 – частицы двух размеров

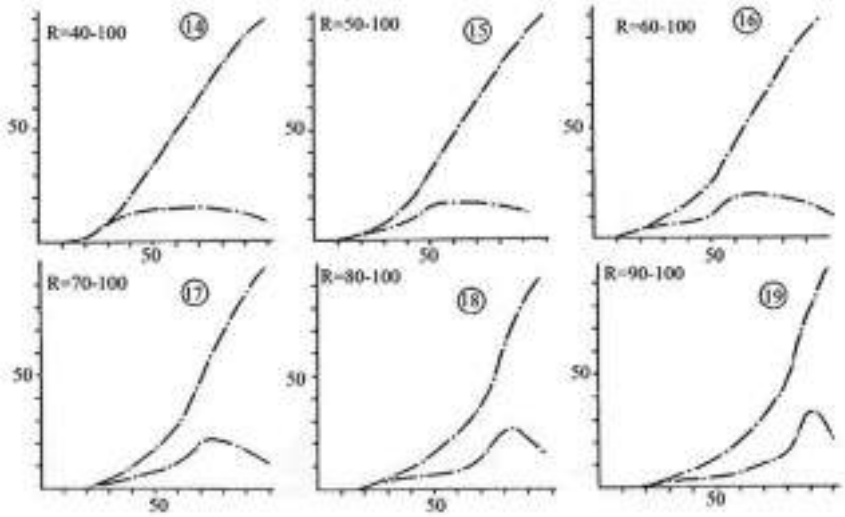


Рис. 5. То же для урезанных распределений размеров сферических частиц

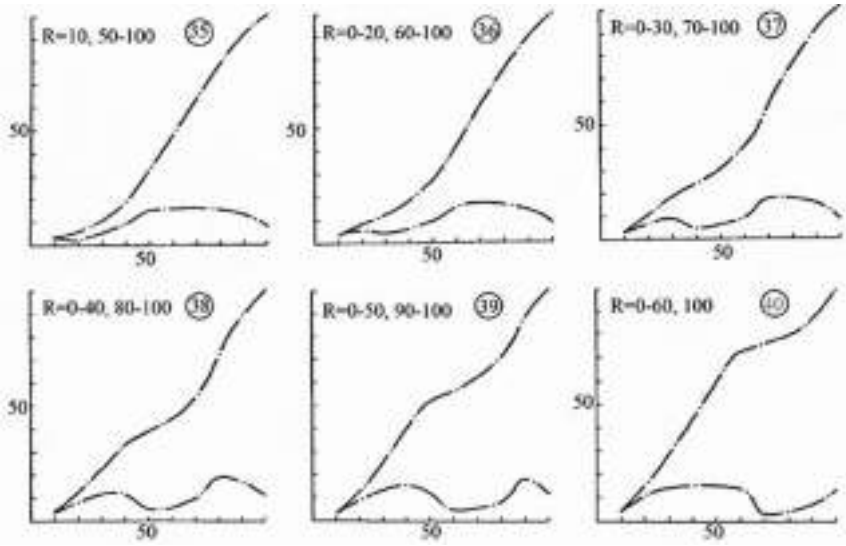


Рис. 6. То же для разорванных распределений размеров сферических частиц

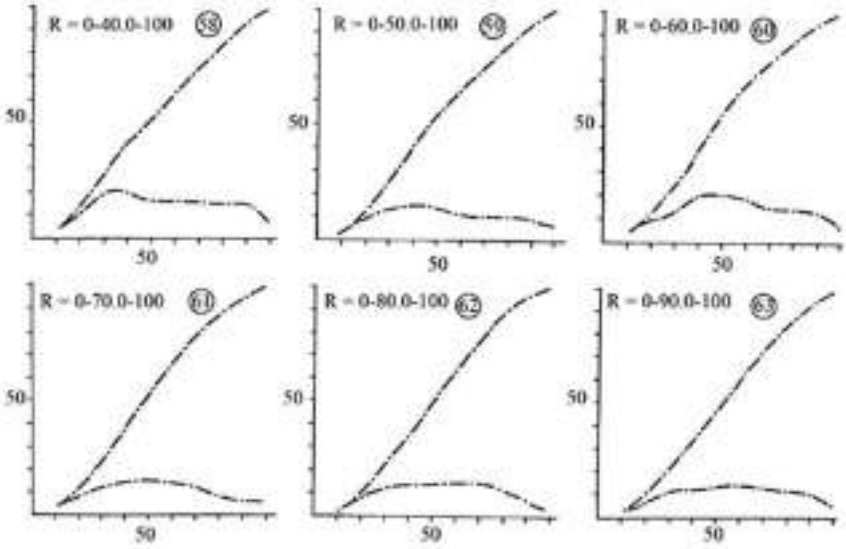


Рис. 7. То же для совмещенных распределений размеров сферических частиц

Обзор применений модального анализа под микроскопом показал следующее. (1) Делесс вполне корректно установил, что объем минеральной фазы в образце заключен между mZ и MZ. Чем ближе m к M, тем точнее оценка объема. Это верно и для оценок по Розивалю и Глаголеву. (2) Ссылка на принцип Кавальери в обоснованиях методов Делесса и Розиваля не корректна: (а) т. к. приводит к исторической ошибке самого Кавальери, (б) т. к. требование равенства (или пропорциональности) суммарных площадей сечений различных минералов от шлифа к шлифу никогда не выполняется. (3) Последнее привело к исследованиям форм тел по их сечениям и созданию междисциплинарного направления – стереологического анализа. Для сферических (и даже эллипсоидальных) частиц задача теоретически решена. Как угодно детальная система модельных распределений может быть заложена в программное обеспечение оптических анализаторов структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Войтеховский Ю. Л. Горная порода: опыты постижения. Апатиты: Изд-во K & M, 2005. 167 с.
2. Войтеховский Ю. Л. Стереологический подход в модальном анализе горной породы: распределения сферических частиц // Тр. X Всерос. научн. школы «Математические исследования в естественных науках». Апатиты, 7–8 апр. 2014 г. Апатиты: Изд-во K & M, 2014. С. 78–99.
3. Войтеховский Ю. Л., Солодов Ю. Л. Стереологический подход в модальном анализе горной породы. Исследование распределений изометричных частиц // Геол. ин-т КНЦ АН СССР, Апатиты, 1989. Деп. в ВИНИТИ 20. 07. 89. N 4793–В89. 38 с.
4. Глаголев А. А. О геометрических методах количественного минералогического анализа горных пород. Тр. ИПМ. № 59. М.-Л.: Госгеолиздат, 1933. 47 с.
5. Глаголев А. А. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. 263 с.
6. Говард И. Нарежьте потоньше // Математический цветник. М.: Мир, 1983. С. 130–143.
7. Журавский А. М. Минералогический анализ шлифа с точки зрения вероятностей // Отдельный оттиск. Матер. по обогащению полезных ископаемых. М.-Л.: Госгеолиздат, 1932. 20 с.
8. Зворыкин А. А. Биографический словарь деятелей естествознания и техники. Т. 1. М.: Гос. научн. изд-во “БСЭ”, 1958. С. 385.
9. Иванов Н. В. Новое направление в опробовании рудных месторождений. М.: Госгеолиздат, 1963. 179 с.
10. Иванов О. П., Ермаков С. Ф., Кузнецова В. Н. Повышение точности определения весового гранулометрического состава рудных минералов по измерениям в шлифах // Тр. ЦНИИ олово. Н.: Наука, 1979. С. 10–14.
11. Кларнер Д. А. Математический цветник. М.: Мир, 1983. С. 487.
12. Ортега-и-Гассет Х. Размышления о Дон Кихоте. Глубь и поверхность. М.: Изд-во «Грюндриссе», 2016. С. 59–61.
13. Прохоров А. М. Большая советская энциклопедия. М.: Изд-во “Сов. энцикл. ”, 1973. С. 109.
14. Чейз Ф. Количественно-минералогический анализ шлифов под микроскопом. М.: Иностр. лит., 1963. 156 с.
15. Чирвинский И. Н. Очередная задача современной петрографии в связи с вопросом о способах определять количественно минералогический состав горных пород // Зап. Урал. об-ва любителей естествознания. 1908. Т. 28. С. 1–38.
16. Шванов В. Н. Песчаные породы и методы их изучения. Л.: Недра, 1969. 248 с.
17. Шванов В. Н., Марков А. Б. Гранулометрический анализ песчаников в шлифах // Геол. и разведка. 1960. № 12. С. 49–55.
18. Delesse M. Procede mecanique pour determiner la composition des roches. // Annales des mines. De memoires sur l’exploitation des mines. Quatrieme serie. Tome XIII. Paris: Carilian-Goeury et Dalmont, 1848. P 379–388. Рус. пер.: [1, с. 148–154].
19. Krumbein W. C. Thin-section mechanical analysis of indurated sediments // J. Geol. 1935. V. 43. P 482–496. 1941. 263 с.
20. Rosiwal A. Über geometrische Gesteinanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter Gesteine // Verhandlungen der keiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt. Wien: Verlag der k. k. Geologischen Reichsanstalt, 1898. S. 143–175. Рус. пер.: [1, с. 155–165].
21. Teuscher E. O. Methodisches zur quantitativen Strukturgliederung körniger Gesteine // Sonderdruck aus “Mineralogische und Petrographische Mitteilungen”. 1933. Bd. 44, H. 5, S. 410–421. Akademische Verlagsgesellschaft m. b. H. in Leipzig. 1933. N 329.
22. The Encyclopedia Ameriana. V. 6. New York, Chicago: Americana Corp., 1944. P. 137.
23. Wicksel S. D. The corpuscle problem. A mathematical study of a biometric problem // Biometrica. 1925. V. 17. P 84–99.
24. Wicksel S. D. The corpuscle problem. 2nd memoir. Case of ellipsoidal corpuscles // Biometrica. 1926. V. 18. P 151–172.

ЗОНАЛЬНОСТЬ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА СОЛЕОТВАЛОВ

Сметанников А. Ф., Оносов Д. В., Оносова Е. Ф.

ГИ УрО РАН, Пермь, e-mail:tm_djucha@mi-perm.ru

Введение

Ранее [1–3], уже обсуждались вопросы преобразования вещества солеотвалов, обнаружение и распределение элементов-микропримесей, соотношение гипергенных процессов в хлоридной составляющей солеотвала и метаморфизации вещества в нерастворимом в воде остатке (Н. О.) галитовых отходов. В настоящем материале сделана попытка дать комплексную оценку этим явлениям.

Целью исследований является изучение зональности вещественного состава солеотвала на территории СКРУ-1 ПАО «Уралкалий», формирование которой связано с влиянием атмосферных осадков в течение длительного времени, а также общий характер гипергенных преобразований с оценкой их влияния на окружающую среду.

Результаты исследований

Исследуемый отвал является самым старым солеотвалом в калийной промышленности.

Отвал сформирован приблизительно в 40-х годах 20-го века.

Он представляет собой гряду вытянутую в широтном направлении высотой 19–25 метров и протяженностью около 300 метров, изрытую промоинами (рис. 1).

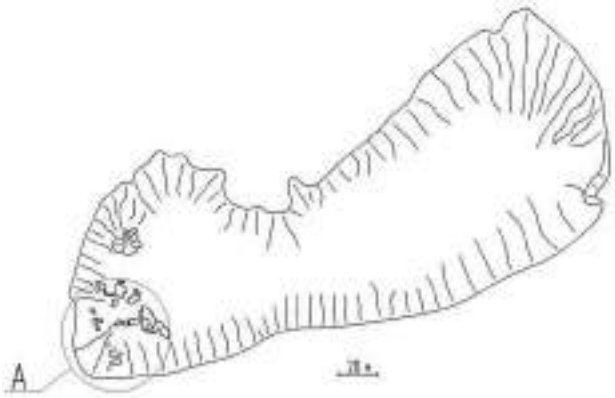


Рис. 1. Общая схема отвала. Литерой А обозначена площадь опробования в западной части отвала, на Южном склоне

Данный материал представлен пробами, отобранными из трех шурфов пройденных на западном склоне солеотвала с интервалом 10 м (на вершине, на склоне с углами 30^0 и 45^0 градусов). Отбор проб проводился на 5–и интервалах, на глубине: 0–0,15; 0,25; 0,5; 1,0 и 1,8 метра (рис. 2). Всего отобрано из шурфов 24 пробы. Кроме того, отобраны пробы из текущих галитовых отходов и товарной руды. Общее количество проб 26.

Проводилась документация шурфов, химический анализ и анализ минерального состава исходных проб количественным рентгено-фазовым методом (РКФА).

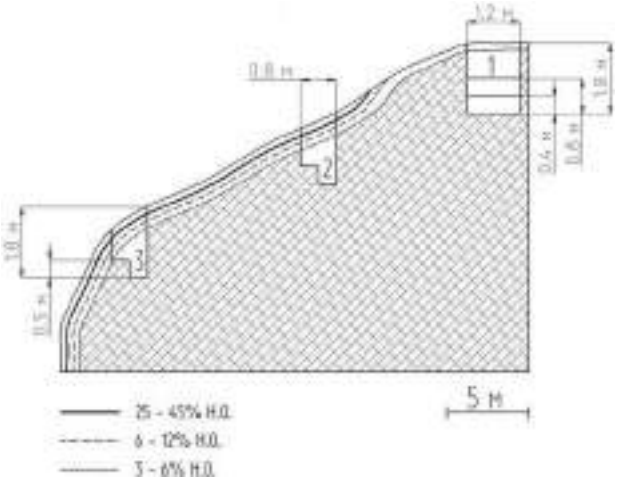


Рис. 2. Зональность вещественного состава солеотвала и схема отбора проб. Примечания: Под цифрой 1 указан разрез О-1; 2 разрез О-2; 3 разрез О-3

Результаты документации стенок шурфов показали, что до глубины 0,25 м материал отвала рыхлый, мелкозернистый, по составу это, в основном, гипс и галит с соотношением 50:50 и примесью минеральных агрегатов красного и черного цвета, размером до 1 мм (рис. 3). На глубине 0,5 м это сцементированный материал с вкрапленной текстурой, где вкрапления представлены галитом, а связующая масса гипсом и частично гидроксидами Fe. Соотношение галита и гипса 80:20 (рис. 4). На глубине 1,0 м это уже плотная сцементированная порода с вкрапленной текстурой, где количество галита составляет 85–95 % (рис. 5). Цемент представлен гипсом. В интервале 1,5–1,8 м это плотная среднезернистая порода с вкрапленной текстурой, где количество галита составляет более 95 %. Иначе говоря, визуально, изменения, связанные с гипергенным преобразованием отвала распространены на глубину 0,5 метра.

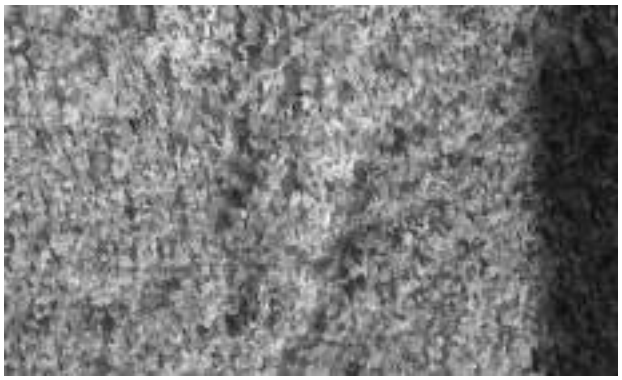


Рис. 3. Слабо сцементированная порода. Интервал 0,15 м

Рис. 4. Порода переходной зоны. Интервал 0,5 м

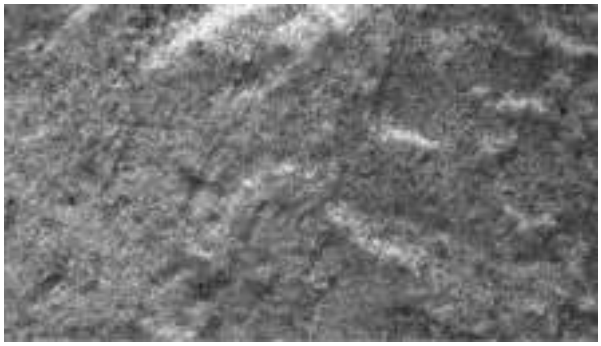


Рис. 5. Сцементированная порода с вкрапленой текстурой. Интервал 1,0 м

Был проведен минералогический и химический анализ проб из трех разрезов. В таблицах 1 и 2 показан состав наиболее характерного разреза № 2 в средней наиболее измененной части солеотвала.

Среднее содержание нерастворимого в воде остатка (Н. О.) составляет: 1) на глубине 0,15 м в верхней части отвала 12 %; 2) в средней части 38 % (табл. 1); 3) в нижней части 48 %.

На глубине 0,25 м эти цифры составляют соответственно 6,6; 28 и 10,5 %.

На глубине 0,5 м содержание Н. О. составляет соответственно – 1,41; 3,6 и 2,0 %.

На глубине 1,0 м содержание Н. О. аналогично текущим галитовым отходам.

В отношении минерального состава (табл. 2) видно, что основными минералами отвальных пород являются галит, гипс и доломит. Сильвин, отмеченный в текущих галитовых отходах, в отвальных породах отсутствует.

Особенностью минерального состава Н. О. отвальных пород, является присутствие сульфата кальция в виде гипса с примесью ангидрита во всем объеме солеотвала. В Н. О. текущих галитовых отходов сульфат кальция представлен только ангидритом.

Таблица 1

Результаты химического анализа. Разрез № 2 (О-2)

№ пробы УЛТП	Массовая доля, %						
	Н. О.	KCl	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	$H_2O_{кр}$	$H_2O_г$
О-2–1 (0,0–0,15м)	23	<0,05	66,4	0,024	7,9	0,03	3,05
О-2–1а (0,0–0,15м)	36	<0,05	52,8	0,024	7,0	0,03	4,66
О-2–1б (0,0–0,15м)	57	<0,05	30,7	0,048	6,1	0,05	6,48
О-2–2 (0,15–0,25м)	18	<0,05	70,2	0,048	7,5	0,05	3,83
О-2–2а (0,15–0,25м)	37	<0,05	51,4	0	6,8	0	5,13
О-2–3 (0,5м)	3,6	0,10	90,7	0,036	4,8	0,04	0,80
О-2–4 (1,0м)	0,93	<0,05	95,5	0	3,02	0	0,54
О-2–5 ((1,8м)	1,14	<0,05	94,8	0,015	3,51	0,02	0,58
ГО-1*	**2,0**	**1,13**	**94,1**	**0,084**	**2,35**	**0,10**	**0,09**

* – текущие галитовые отходы

Таблица 2

Результаты РКФА. Разрез № 2 (О-2)

№ пробы УЛТП	Минеральный состав (прибл. вес. %)						
	галит	сильвин	гипс	ангидрит	доломит	магнезит	кварц
О-2–1 (0,0–0,15м)	67		24	1	6	1	1
О-2–1а (0,0–0,15м)	56		29	1	12	1	2
О-2–1б (0,0–0,15м)	24		54	2	15	1	3
О-2–2 (0,15–0,25м)	64		28	1	6	1	1
О-2–2а (0,15–0,25м)	55		28	1	13	1	2
О-2–3 (0,5м)	92		5	сл.	3	сл.	
О-2–4 (1,0м)	98		2				
О-2–5 ((1,8м)	98		2		сл.		
ГО-1	97	1		2			

Это свидетельствует о том, что гипергенные преобразования, связанные с выщелачиванием галита распространяются на глубину до 0,5 м, а изменения связанные с гидратацией ангидрита и преобразованием его в гипс прослеживаются на всю глубину солеотвала.

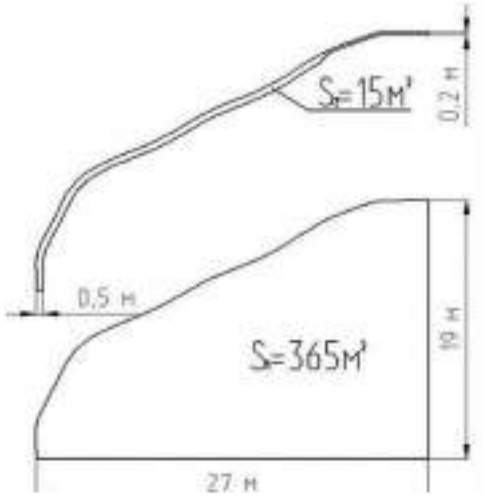


Рис. 6. Схема площадей измененных пород солеотвала

Таким образом, преобразование солевой части солеотвала происходит под влиянием атмосферных осадков с выносом NaCl, относительным накоплением Н. О. и формированием зоны изменений глубиной 0,5 метра. Ниже этого интервала сохраняется соотношение NaCl и Н. О. свойственное текущим галитовым отходам и происходит литификация пород солеотвала с формированием техногенной соляной породы – галитита.

Исходя из этого, состояние солеотвала, оценивается, как стабильная «природно-техногенная» система», где изменения, способствующие вымыванию хлоридов, представляющих экологическую опасность для окружающей среды, затрагивают 4–5 % объема отходов (рис. 6).

Преобразования Н. О. отходов в отличие от хлоридной части проявлены во всем объеме солеотвала. В первую очередь это связано с преобразованием сульфатов кальция. В солеотвале это гипс, а в текущих галитовых отходах, это исключительно ангидрит. Преобладание гипса в Н. О. солеотвала сохраняется на всю его глубину и связано с гидратацией ангидрита. Т. е в отличие от хлоридной части, преобразования Н. О. проявлены во всем объеме солеотвала.

С глубиной степень гидратации ангидрита несколько уменьшается. Каких либо преобразований в составе карбонатов, магнезита кварца и полевых шпатов не отмечается.

Следует вывод, что сульфаты кальция (гипс, ангидрит) являются индикаторами преобразования Н. О. в разрезе солеотвала. Магнезит, а особенно кварц, полевые шпаты, в процессе преобразования Н. О. инертны.

Гранулометрический анлиз Н. О. проб и исследования материала классов крупности от -1 до + 0,071мм, методом оптической микроскопии позволили обнаружить минералы, отсутствующие в текущих галитовых отходах.

Это минеральные агрегаты черного (khv-1) и красного цвета (khv-2). Агрегаты белого цвета (Khv3) представлены смесью гипса и ангидрита и составляют основу Н. О. в текущих отходах (табл. 3). Агрегаты khv2 являются также смесью гипса и ангидрита с примесью доломита, обнаружены только в соляных породах солеотвала, где присутствуют совместно с агрегатами Khv3 в соотношении 10:100. Наиболее необычны по составу агрегаты khv1, ранее не встречаемые в соляных породах.

Анализ новообразований методом ИСП МС (табл. 4) показал, наличие в них нескольких групп элементов микропримесей. Это щелочноземельные, халькофильные, редкоземельные элементы, редкие металлы, никель, цирконий. Содержание элементов микропримесей повышается от исходного агрегата гипса и ангидри-

та (khv3), к новообразованному (khv2). Агрегат khv1 представляет собой минеральное новообразование с наиболее высокой концентрацией элементов-микропримесей превышающей концентрации микропримесей в новообразованных агрегатах гипса и ангидрита на 2–4 порядка.

Источником микропримесей в минеральных новообразованиях является, скорее всего сульфатная составляющая Н. О., но для Be, Gf, Ta, W скорее всего, источником их, как и халькофильных элементов, является карбонатно-силикатная составляющая Н. О.

Таблица 3

Минеральный состав новообразований Н. О. (по данным РКФА), %

Моно фракция	гипс	ангидрит	доломит	кварц	пирит	муллит	SiC
Khv1	8	–	2	21	31	38	1–2
Khv 2	71	26	2				
Khv 3	54	44	2				

Таблица 4

Состав микропримесей новообразований по данным ИСП МС, г/т

Элемент	Khv1	Khv 2	Khv 3	Элемент	Khv1	Khv 2	Khv 3
Li	209	1,43	0,38	La	46,3	0,190	0,046
Be	6,56	<0,012	<0,012	Ce	96,1	0,85	0,28
Sc	20,4	0,164	0,028	Pr	11,8	0,111	0,039
V	123	2,86	0,63	Nd	46,4	0,48	0,164
Cr	121	0,89	0,105	Sm	9,11	0,129	0,027
Co	30,8	0,97	0,51	Eu	2,04	0,026	0,018
Ni	110	3,38	2,45	Gd	8,62	0,084	0,069
Cu	346	50,7	45,0	Tb	1,27	0,016	0,008
Zn	223	3,46	7,60	Dy	8,25	0,081	0,039
Ge	7,98	0,39	0,31	Ho	1,65	0,010	0,010
As	30,7	0,48	0,49	Er	5,06	0,040	0,034
Se	<0,20	0,76	0,57	Tm	0,70	0,003	0,003
Rb	37,7	0,34	0,092	Yb	4,85	0,020	0,022
Sr	301	720	915	Lu	0,69	<0. 004	0,005
Y	50,4	0,35	0,22	Hf	6,65	0,011	<0,002
Zr	204	0,31	0,125	Ta	1,49	<0. 001	<0,001
Nb	25,1	0,146	<0,002	W	3,14	<0. 002	0,025
Mo	7,62	0,162	0,41	Re	<0,002	<0. 002	<0,002
Cd	0,58	0,24	0,107	Tl	0,054	<0. 002	<0,002
Sn	4,34	0,157	0,035	Pb	31,3	9,63	9,73
Sb	2,13	0,017	0,065	Bi	0,045	0,010	0,023
Te	<0,040	<0. 040	<0,040	Th	11,5	0,069	0,029
Cs	2,66	0,009	<0,001	U	6,65	0,307	0,410
Ba	58,75	2,13	117				

Выпадают из описанного ряда щелочноземельные элементы. При формировании агрегата khv2 наблюдается их меньшие содержания в сравнении с исходным. Это свидетельствует о некотором рафинировании при формировании новообразований гипса и ангидрита.

Общей причиной формирования минеральных новообразований и концентрирования в них микропримесей является метаморфизация вещества как всего объема солеотвала, так и его Н. О. в условиях литификации соляных пород.

С целью установления формы нахождения элементов примесей, из монофракций khv1 капиллярным методом [4, 5] выделялись частицы минеральных фаз. Микрозондовый (МРС) анализ частиц позволил выявить ряд минеральных фаз, не отвечающих по стехиометрии минералам, имеющим в составе катионы Cu, Pb, Ni, W (халькопирит, галенит, пентландит), но по остаточным содержаниям S, оксидов Fe близких к окисленным формам этих минералов (рис. 7–11). Часть минералов может быть отнесена к шеелиту, сфену (рис. 7). Отмечено много скелетных образований оксидов Fe, привязанных к муллиту (рис. 12). Это связано с окислительными процессами в Н. О. солеотвала.

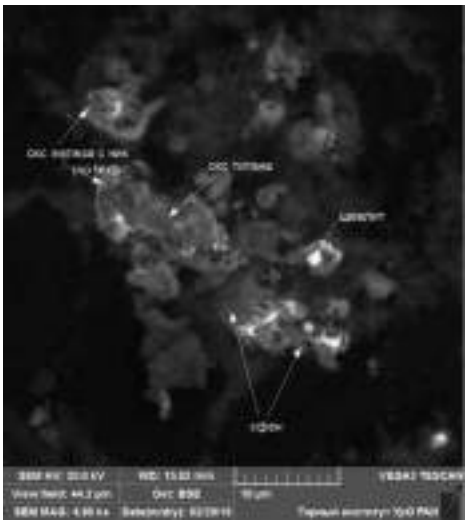


Рис. 7. Электронное микрофото (режим BSE): шеелит; оксид FeNi; сфен; оксид Ti

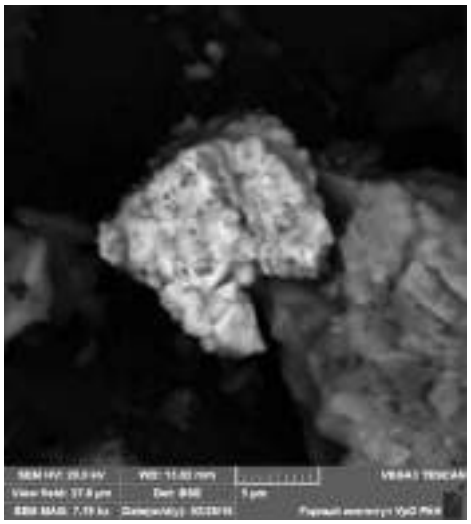


Рис. 8. Электронное микрофото (режим BSE): измененный х. пирит

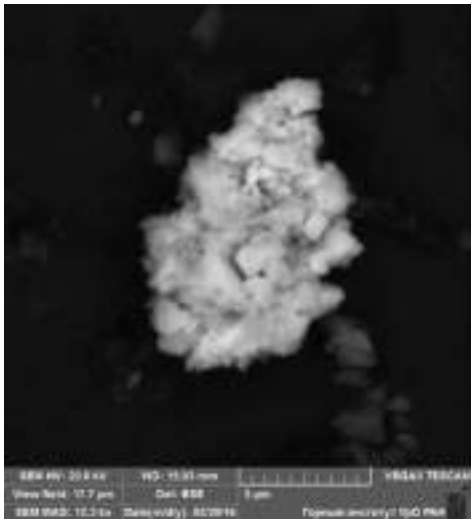


Рис. 9. Электронное микрофото (режим BSE): оксид Cu

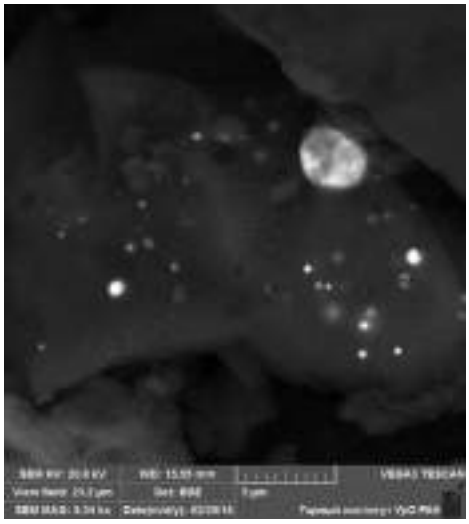


Рис. 10. Электронное микрофото (режим BSE): оксид Pb в кремнеземе

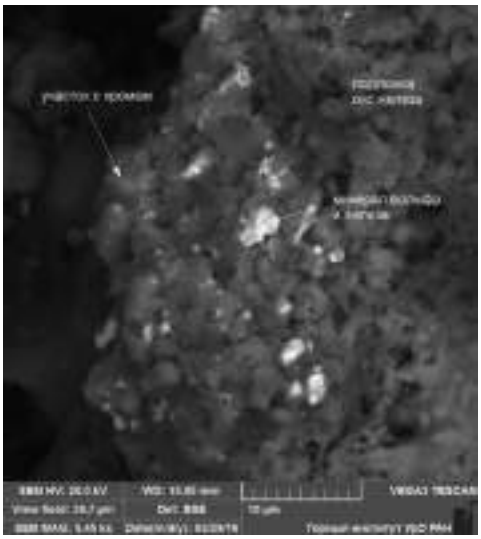


Рис. 11. Электронное микрофото (режим BSE): минералWи Fe

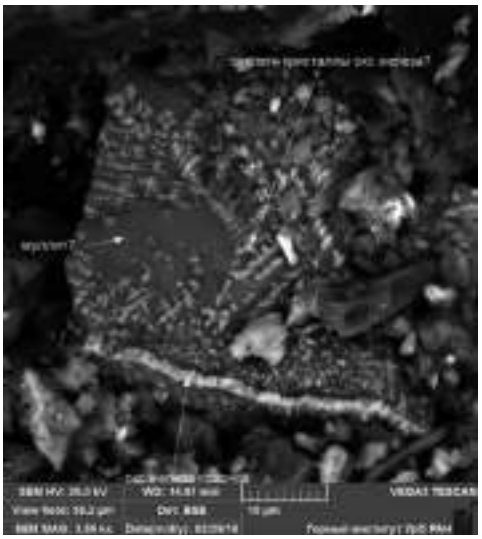


Рис. 12. Электронное микрофото (режим BSE): скелетные кристаллы оксида Fe в муллите

Таблица 5

Микрозондовые анализы

Рис. 7. Шеелит; Оксид Fe Ni; Сфен; Оксид Ti																	
Шеелит	O	S	Ca	Ti	Fe	W		Si	Cu	Ni		Pb		Al	V	Zr	
	27,16	1,89	15,28	7,64	1,14	46,61											
Оксид Fe,Ni	32,6	4,58	5,05	1,97	42,65	3,1		2,18		6,93							
Сфен	45,91	0,38	16,89	20,33	0,45	1,45		12,39						0,15	0,92	0,92	
Рис. 8. Измененный х. пирит																	
Х. пирит	13,68	1,2	0,34		2,06		0,65		81,7								
Рис. 9. Оксид Cu																	
Оксид Cu	15,05	0,21			1,01		0,64		82,3					0,47			
Рис. 10. Оксид Pb в кремнеземе																	
Оксид Pb	20,35		0,48		3,2		2,64		3,04				68,1	0,67			

Обсуждение результатов

Результаты исследований свидетельствуют, что в солеотвале проявлены процессы преобразования вещества двух типов. Первый это преобразование солевой части солеотвала с выносом NaCl под влиянием атмосферных осадков и относительным накоплением Н. О., при этом формируется зона изменения глубиной 0,5 метра. Ниже этого интервала сохраняется соотношение NaCl и Н. О. свойственное текущим галитовым отходам и происходит литификация основного объема солеотвала с формированием техногенной соляной породы – галитита.

Обоснованием незначительной глубины вымывания хлоридов является следующее обстоятельство. Текущие галитовые отходы перемещаются на солеотвал по транспортеру с остаточной влажностью 5–7 %. Остаточная влага в межзерновом пространстве представляет собой насыщенный соляной раствор. Поэтому выпадение атмосферных осадков на солеотвал не обеспечивает достаточно полного растворения хлоридной составляющей отвала. И осадки стекают по поверхности отвала, смывая незначительную часть отходов (большую часть чисто механически) и формируют зону изменения небольшой мощности, разница, в глубине которой определяется углом склона отвала. На вершине отвала наименее глубокая зона преобразования – это застой, при угле склона 30 градусов наиболее глубокая зона (медленнее стекает) и средней глубины зона при склоне 45^0 (сильный сток).

Преобразования второго типа проявлены в Н. О. во всем объеме солеотвала и связаны с особенностями состава галитовых отходов в которых «законсервировано» 5–7 % влаги присутствующей в текущих галитовых отходах. Наличие влаги и процесса уплотнения (литификации) – факторы, способствующие гидратации ангидрита и формированию минеральных новообразований аккумулирующих элементы микропримеси, преобразованные в минеральные фазы.

Этот процесс сопровождался окислением сульфидов Cu, Pb, Ni с образованием оксидных форм этих металлов. Все эти явления характеризуются как проявление метаморфизма в условиях гипергенеза. Характерно, что собственно гипергенные преобразования (вымывание хлоридов) и, преобразование Н. О. происходит практически одновременно. Это доказывается тем, что в зоне гипергенного преобразования можно видеть преобразованный Н. О. со всем набором минеральных новообразований, как и во всем объеме солеотвала. Таким образом, замкнутость объема, эффект уплотнения (литификации), преобразование Н. О. заключающееся в гидратация ангидрита и окислительных реакциях минеральных новообразований, позволяют отнести процесс преобразования Н. О. солеотвала, к метаморфическим процессам.

Выводы

Главными выводами исследований являются:

1. Низкая степень преобразования солевой части солеотвала, с образованием зоны изменений глубиной 0,5 м и литификацией основного объема галитовых отходов, сохраняющих соотношение хлоридной части и Н. О., свойственное текущим галитовым отходам. Именно в этом объеме формируется уплотненная соляная порода – галитит.

Исходя из этого состояние солеотвала, оценивается, как «стабильная природно-техногенная» система, где изменения, способствующие влиянию вещества измененных зон на окружающую среду, затрагивают не более 4–5 % объема отходов.

2. Преобразования в Н. О. отходов сопровождаются формированием минеральных новообразований аккумулирующих и концентрирующих элементы. Этот процесс связывается с явлением метаморфизации вещества солеотвала и квалифицируется как метаморфизм в условиях гипергенеза. Причем процессы новообразования сопровождались и сопровождаются окислением сульфидов Cu, Pb, Ni с образованием оксидных форм этих металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сметанников А. Ф., Оносова Е. Ф. Распределение и содержание элементов-микропримесей в нерастворимом мв воде остатке галитовых отходов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении (Чтения памяти П. Н. Чирвинского). – Пермь: вып 19, 2016. С. 331–336.
2. Сметанников А. Ф., Оносов Д. В., Оносова Е. Ф. Особенности гипергенного преобразования солеотвалов // Стратегия и процесы освоения георесурсов. Сб. научных трудов ГИ УрО РАН. 2016. С. 71–76.
3. Сметанников А. Ф., Оносова Е. Ф. Минеральные преоборазования в солеотвалах как следствие гипергенного метаморфизм // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения 2016), – Сыктывкар: 2016. С. 252–255.
4. Сметанников А. Ф. Капиллярный метод извлечения микро- и наночастиц минералов из тонких фракций // Юшкинские чтения – Сыктывкар, 2014. – С. 177, 178.
5. Вода в дисперсных системах // под ред. Б. В. Дерягина / М.: Химия, 1989. 287 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАРЦА КАРЕЛО-КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Раков Л. Т. [1], Скамницкая Л. С. [2], Дубинчук В. Т. [3], Ружицкий В. В. [3]

[1]ИГЕМ РАН, Москва; [2]ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск; [3]ФГБУ “ВИМС”, Москва, rakovlt@mail.ru

Введение

Несмотря на значительные разведанные запасы кварцевого сырья в России существует дефицит кварца высокой чистоты. Он обусловлен жесткими техническими требованиями, предъявляемыми мировыми стандартами к этому виду сырья. В то же время потребность в кварце высокой чистоты в России и за рубежом с каждым годом возрастает. Она вызвана развитием высоких технологий в электронной, химической, космической и других отраслях промышленности. В этой связи, выявление источников кварцевого сырья, легкообогатимого и пригодного для получения современных высококачественных продуктов, представляется весьма актуальной задачей.

Принадлежность кварца к категории высокочистого определяется содержанием в нем примесей: минеральных, пленочных, газово-жидких включений, а также элементов-примесей, рассеянных в виде отдельных атомов на дефектах кристаллической структуры кварца. Современные технологии позволяют практически полностью удалять пленочные, минеральные примеси и частично примеси, локализованные в газово-жидких включениях. Однако устранение рассеянных примесей из кварца сопряжено с большими трудностями. Наиболее трудоемким является извлечение структурных примесей, которые изоморфно замещают в кристаллической решетке кварца ионы кремния. К ним относятся примеси Al, Ti, Fe, Ge и др. Их концентрация сравнительно невелика, но почти не изменяется при технологическом переделе кварцевого сырья и фактически определяет собой предел обогатимости кварца.

Отсюда следует, что особенности кристаллической структуры, и, прежде всего, содержание изоморфных примесей в кварце, имеют большое значение для технологии его обогащения и должны учитываться при оценке перспективности кварцевого сырья.

Влияние условий минералообразования на кристаллическую структуру кварца

Содержание изоморфных примесей в кварце в решающей степени зависит от условий минералообразования. Однако характер их влияния достаточно сложный и определяется рядом обстоятельств.

Изучение процесса изоморфизма в природном кварце показало, что он протекает в две стадии [1]. Первая стадия связана с процессом кристаллизации минерала, когда атомы примесей могут входить в его кристаллическую решетку. Вторая стадия осуществляется уже в самом кварце вследствие

диффузии примесей при повышенных температурах и внедрения их в кристаллическую структуру. Обнаружено, что вторая стадия изоморфизма является основной, т. к. с ней связано образование большей части структурных примесей.

Нами было установлено, что реализация второй стадии становится возможной благодаря динамической рекристаллизации кварца [2]. Известно, что динамическая рекристаллизация протекает при высоких температурах и давлениях и приводит к формированию кристаллической структуры кварца. Она способствует снятию механических напряжений в минерале путем замещения деформированных зерен новыми, недеформированными. В результате образуются кристаллиты кварца с более совершенной кристаллической структурой, а общая степень кристалличности минерала повышается.

Можно выделить три степени динамической рекристаллизации кварца, различающиеся механизмами реализации [3, 4]. Первая стадия осуществляется при температурах T=250−400ºС и связана с локальным перемещением (выдавливанием) границ дефектных микроблоков кварца и образованием менее деформированных зерен (механизм BLG − от англ. *bulging*). Вторая стадия, протекающая при T = 400−500 ºС, приводит к повороту одних частей микроблоков кварца относительно других и появлению более совершенных зерен (механизм SGR − “subgrain rotation”). Третья стадия реализуется при T > 500 ºС и вызывает высокотемпературную миграцию границ зерен GBM – “grain boundary migration”.

Одновременно с перестройкой кристаллической структуры кварца изменяется форма нахождения в нем атомов рассеянных примесей. Первоначально они концентрируются вблизи точечных дефектов, дислокаций, пор, трещин и разобщены между собой. При динамической рекристаллизации примеси вытесняются в зоны дефектности, где они приобретают высокую диффузионную подвижность и возможность взаимодействовать друг с другом и с кристаллитами кварца.

При внедрении в кристаллиты атомы примесей вынуждены занимать позиции в кристаллической решетке, т. к. количество структурных нарушений в кварце, где они могут локализоваться, резко уменьшается. Поэтому закономерным итогом динамической рекристаллизации становится увеличение в минерале количества изоморфных примесей.

Связь технологических свойств с динамической рекристаллизацией кварца

Исходя из вышеизложенного, можно считать, что динамическая рекристаллизация стимулирует развитие процессов, по-разному влияющих на технологические свойства кварца.

С одной стороны, она способствует его очищению и образованию областей совершенной кристаллической структуры. При этом атомы рассеянных примесей концентрируются в зонах дефектности, где они становятся доступными для выщелачивания методами высокотемпературного хлорирования.

С другой стороны, динамическая рекристаллизация приводит к обогащению кварца изоморфными примесями. Особенно активно этот процесс протекает на третьей стадии рекристаллизации, когда атомы рассеянных примесей начинают интенсивно внедряться в кристаллиты кварца. Одновременно с этим наблюдается уменьшение степени кристалличности кварца, обусловленное вхождением в кристаллическую структуру чужеродных атомов.

Следовательно, оптимальным для формирования кварца высокой чистоты является промежуточный этап динамической рекристаллизации. Он обеспечивает наибольшую степень кристалличности кварца и умеренный уровень содержаний изоморфных примесей. На более ранних этапах динамической рекристаллизации кварц недостаточно раскристаллизован, а на более поздних чрезмерно обогащается структурными примесями. Можно предположить, что оптимальный этап отвечает концу второй − началу третьей стадии динамической рекристаллизации кварца.

Цель и объекты исследований

Приведенные соображения были использованы при изучении перспектив обогащения кварца из генетически различных месторождений и проявлений кварцевого сырья Карельского кратона, расположенного пределах Карело-Кольского региона.

Основное внимание уделялось исследованию кварца из наиболее крупных месторождений и рудопроявлений Карело-Кольского региона: Меломайс, Степаново озеро, Рухнаволок, Фенькина Лампи, Майское и Перчатка. Их геологические особенности, технологические свойства и методы обогащения кварца с этих объектов рассматривались в ряде работ [5–9]. Настоящие исследования преследовали цель дополнить результаты, полученные ранее, новыми

данными о структурных характеристиках кварца, имеющих технологическое значение, и использовать приобретенные сведения для разработки более эффективных технологий обогащения кварцевого сырья.

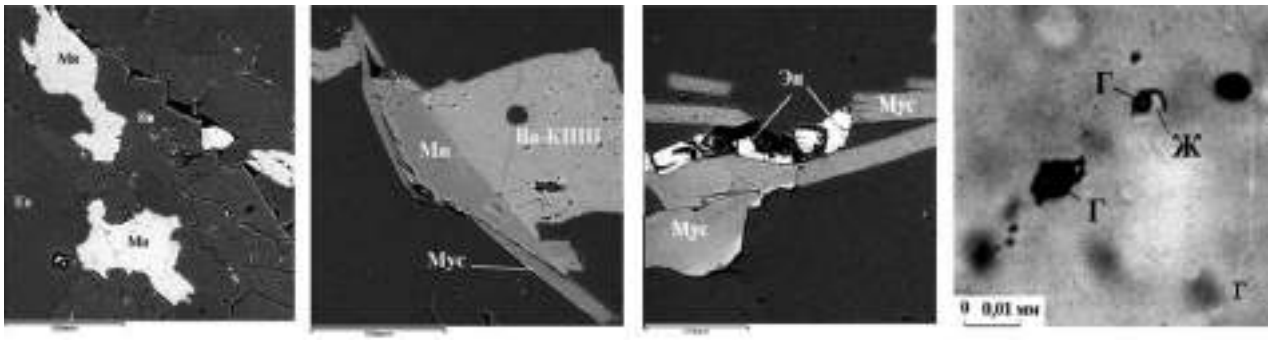
Методы исследований

Для исследования крупных минеральных и газово-жидких включений в кварце был использован комплекс стандартных оптико-минералогических возможностей поляризационного микроскопа ПОЛАМ R-211. Включения и дефекты кристаллической структуры кварца субмикроскопического уровня изучались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ), обеспечивающим получение контрастной картины распределения сохранившихся кристаллитов. С этой целью использовался микроскоп “Tesla” BS-301, укомплектованный энергодисперсионным спектрометром.

Детали кристаллического строения кварца в данной работе исследовались методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) на спектрометре ER-420 “Bruker”. В отобранных образцах кварца были измерены концентрации изоморфных примесей Al и Ti (N_{Al} и N_{Ti}), а по виду спектров ЭПР каждого из них оценивалась степень кристалличности D минерала. Перевод изоморфных примесей в парамагнитное состояние осуществлялся путем специальной радиационной обработки проб кварца. Она способствовала захвату ионами примесей свободных электронов или дырок, необходимых для регистрации их методом ЭПР. Радиационная обработка заключалась в облучении кварца электронами с энергией 7 МэВ на ускорителе.

Геолого-минералогическая характеристика исследуемого материала

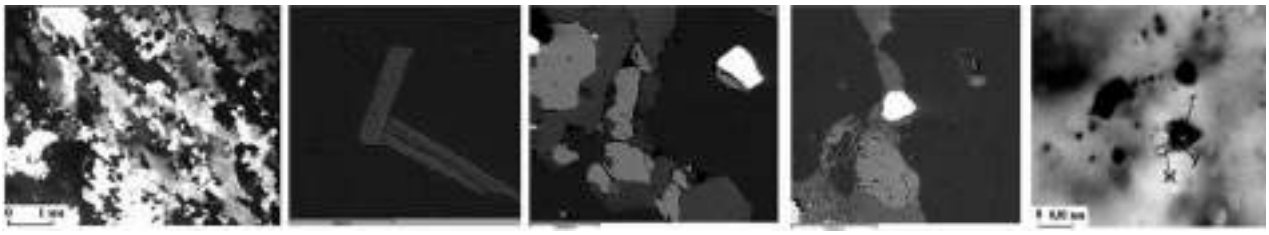
Рудопроявление Меломайс. По данным геологических исследований кварцевое тело участка Меломайс, представляющее собой мощную кварценосную зону, залегает в архейских гранито-гнейсах. В пределах жилы наблюдаются чередование без закономерной последовательности различных типов кварца: 1 – серого рассланцованного с участками сливного, 2 – массивного серовато-белого с полевым шпатом, имеющего иногда розоватый оттенок, 3 – сливного белого кварца, образующего в основном вытянутые зоны или небольшие жилки. По минеральному составу кварцевая жила довольно однородна, суммарное содержание минеральных примесей варьирует от 1 до 5 %. Минеральные примеси, представлены: мусковитом; биотитом, который часто замещается хлоритом; калиевым полевым шпатом, представленным микроклином и Ba-K-содержащим полевым шпатом и плагиоклазом (рис 1). В качестве единичных зерен присутствует эпидот. Микровключения равномерно распределены в породе, крупные зерна приурочены к трещинам.



а б в г

Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения минеральных и ГЖВ включений в кварце рудопроявления Меломайс: а – мусковит, б – полевой шпат, в – эпидот, г – ГЖВ

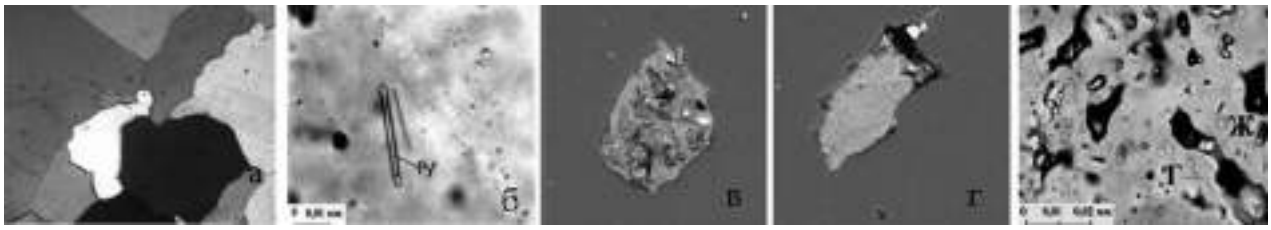
Рудопроявление Степаново Озеро. Кварцевые породы проявления Степаново Озеро представлены кварцитами, залегающими среди вулканогенно-осадочных пород лопийского комплекса верхнего архея. Содержание кварца в кварцитах варьирует от 88 % до 100 %. Основной минеральной примесью является мусковит, который развивается по субпараллельным трещинам и иногда в виде мелкодисперсных включений находится внутри зерен кварца, изредка присутствует плагиоклаз (рис. 2). В качестве микровключений встречаются рудные (пирит, сфалерит), апатит, клиноцоизит.



а б в г д

Рис. 2. Структура и электронно-микроскопические изображения минеральных и ГЖВ включений в кварце рудопроявления Степаново озеро: а – структура кварца, б – мусковит вдоль границ зерен, в – мусковит и кальцит вдоль границ зерен, включение пирита, г – плагиоклаз с включением апатита вдоль границ зерен кварца, д – ГЖВ

Рудопроявление Рухнаволок. Это проявление представлено серией мелких кварцевых жил с гранулированным кварцем, который тяготеет к центральным частям жил и составляет от 25 до 50 % объема. Жилы залегают в амфиболитах и амфибол-биотитовых гнейсах и гранатовых амфиболитах. Отмечается присутствие рудных минеральных примесей (рутила, ильменита, магнетита, пирита, сульфидов), а также амфибола, мусковита и кальцита (рис. 3).

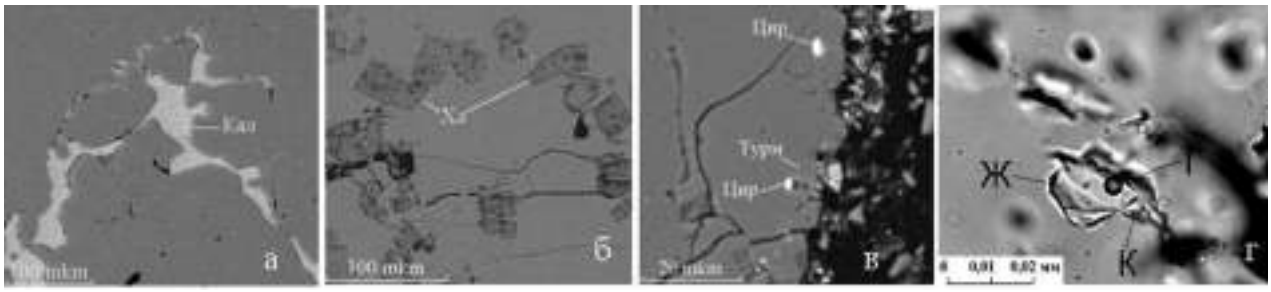


а б в г д

Рис. 3. Структура и электронно-микроскопические изображения минеральных и ГЖВ включений в кварце рудопроявления Рухнаволок: а – структура, б – рутил, в – мусковит, г – амфибол, д – ГЖВ

Месторождение Фенькина Лампи. На месторождении жильного кварца Фенькина Лампи вмещающие породы представлены полевошпат-кварцевыми песчаниками и карбонатизированными песчано-глинистыми сланцами.

В пределах кварцевых тел выделены четыре типа кварца, которые образуют небольшие зоны и участки: I – молочно-белый крупно-гигантозернистый, II – серовато-белый средне-крупнозернистый, III – светло-серый средне-крупнозернистый, IV – серый средне-крупнозернистый, кавернозный. Кварц в основной массе непрозрачный из-за большого количества газово-жидких включений (рис. 4).



а б в г

Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения минеральных и ГЖВ включений жильного кварца Фенькина Лампи: а – кальцит, б – хлорит, в – акцессорные: рутил, турмалин, циркон, г – ГЖВ (ж – жидкость, Г – газ, К – кристалл)

Минеральные включения в кварце изученных объектов, содержащиеся в отчетливо повышенных количествах и обуславливающие специфику процессов обогащения, представлены слюдами (мусковит, флогопит, биотит), полевыми шпатами (микроклин, плагиоклаз) и карбонатами. Осложняют процессы обогащения ГЖВ, микровключения минералов и структурные примеси.

Валовые содержания элементов-примесей в обогащенном кварце

Качественные характеристики кварцевых концентратов, полученных по схемам переработки, включающим усреднение, дробление, измельчение, классификацию, магнитную сепарацию, флотацию и кислотное травление приведены в табл. 1.

Таблица 1

Содержания элементов-примесей (ppm) в кварцевых концентратах обогащения

Объект	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	Cr	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Co	Сумма
Меломайс	3,3	1,1	0,46	19	0,05	0,086	0,06	0,09	1,9	2,6	0,35	0,023	0,016	0,032	8	3,6	0,27	0,1	0,24	0,01	**41,318**
Фенькина-Лампи	0,74	0,15	0,043	20	0,25	0,2	0,1	0,37	0,49	11	0,62	0,013	0,012	0,03	14	47	**0,35**	0,3	0,2	0,01	**95,878**
Рухнаволок	0,91	2,8	0,01	20	0,021	0,04	0,055	0,07	0,32	2,2	0,035	0,052	0,01	0,024	2,5	25	**3,1**	0,44	0,1	0,01	**57,735**
Степаново озеро	0,5	3,9	0,05	35	0,04	0,1	0,037	0,21	0,23	0,6	0,017	0,01	0,025	0,06	2,8	1,0	**4,1**	0,7	0,2	0,01	**49,496**

Обогащение кварца по месторождениям с учетом минералого-структурных особенностей пород, позволили существенно снизить содержания элементов-примесей в кварцах всех объектов, по сравнению с полученными ранее результатами обогащения как по схемам предварительной, так и глубокой очистки [7]. Преимуществом кварца карельских месторождений после глубокого обогащения является стабильно низкое содержание Ti и Li, которые относятся к наиболее тяжело удаляемым примесям при технологической обработке, при стабильно высоком содержании алюминия, что показывает необходимость дополнительных структурно-минералогических исследований.

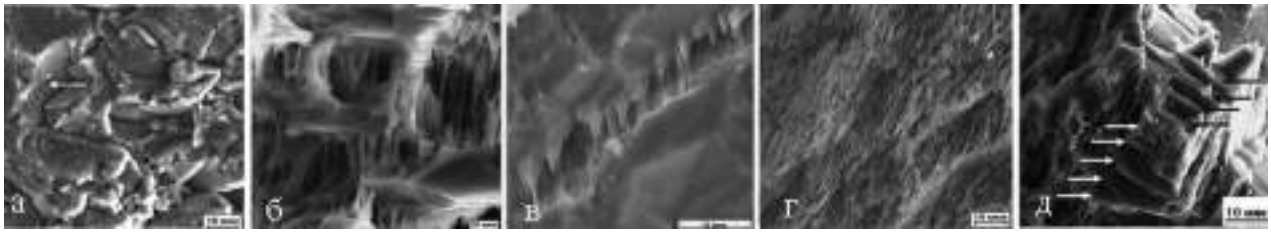
Распределение рассеянных примесей в кварце

Для повышения качества кварцевых концентратов были проведены исследования, направленные на определение форм нахождения в кварце рассеянных примесей и разработку способов их устранения.

Концентрация рассеянных примесей в большой степени определяет качество кварцевого сырья. Возможность их устранения зависит от характера распределения этих примесей в кварце. О его виде можно судить по картине взаимного расположения субмикроскопических неоднородностей в кварце после обработки в плавиковой кислоте. Воздействие кислоты приводит к растворению демпферных зон, наиболее загрязненных рассеянными примесями [10]. В них атомы примесей захватываются структурными дефектами, количество которых в зонах велико. В то же время области кварца, где содержание рассеянных примесей мало (кристаллиты), практически не затрагиваются влиянием HF.

Распределение рассеянных примесей отражает степень динамической рекристаллизации кварца. Если она проявлена слабо, то рассеянные примеси не вытесняются из одной зоны в другую, и все микроблоки кварца содержат приблизительно одинаковую их концентрацию. В этом случае наблюдается более или менее равномерное растворение различных областей кварца, и картина распределения субмикроскопических неоднородностей монотонна. Если же имеет место интенсивная динамическая рекристаллизация кварца, то она вызывает существенное перераспределение рассеянных примесей. Тогда обработка в HF приводит к появлению контрастной картины распределения субмикроскопических неоднородностей.

Рис. 5 дает представление о степени динамической рекристаллизации и, соответственно, о характере распределения рассеянных примесей в кварце разных месторождений.



а б в г

Рис. 5. Микрофотографии кварца разных объектов, обработанного в плавиковой кислоте:
а – Фенькина Лампи, *б* – Майское, *в* – Перчатка, *г* – Меломайс

Для кварца месторождения Фенькина-Лампи, образование которого протекало в условиях низких давлений и температур, отмечается монотонный вид поверхности после обработки в HF (рис. 5а). В нем не обнаружено обширных демпферных зон, растворяемых в плавиковой кислоте и имеющих вид полостей. Отсюда следует, что данный тип кварца не требует операций интенсивного химического травления для устранения рассеянных примесей. Само состояние кристаллической структуры кварца отвечает динамической рекристаллизации первой степени.

В образцах кварца рудопроявления Майское уже присутствуют следы динамической рекристаллизации второй степени и последующего перераспределения рассеянных примесей. В результате в кварце возникают демпферные зоны и новообразованные кристаллиты, имеющие причудливые формы (рис. 5б). При обогащении такого кварца необходимо проводить операцию химического травления.

В кварце рудопроявления Перчатка после обработки в HF обнаруживается сотовая структура кристаллитов (рис. 5в). Как известно, она характерна для динамической рекристаллизации третьей степени [11]. Появление такой структуры затрудняет удаление демпферных зон путем обработки кварца в HF. Кроме того, ее образование приводит к резкому росту в кристаллитах кварца содержания изоморфных примесей, что также снижает качество кварцевого сырья [2].

Картина распределения субмикроскопических неоднородностей в кварце рудопроявления Меломайс отличается своей сложностью (рис. 5г). В ней присутствуют все описанные выше фрагменты: участки монотонного распределения неоднородностей, кристаллиты различных форм (указаны стрелками), сотовые структуры и т. д. Многообразие форм кристаллитов указывает на многостадийность процесса минералообразования, связанную с перекристаллизацией кварца. Разработка схем обогащения этого сырья требует учета присутствия в нем нескольких генераций кварца.

Снижение подвижности рассеянных примесей

Любая технология обогащения кварца не обходится без прогрева его при высоких температурах. Наиболее часто эта операция используется при термодроблении кварцевого сырья, высокотемпературном хлорировании кварцевой крупки и других процедурах. Однако нагревание кварца приводит к миграции рассеянных примесей, локализованных в демпферных зонах, и внедрению их в кристаллиты. При этом часть внедренных примесей способна переходить в изоморфную форму, что существенно усложняет их извлечение при обогащении кварца.

Во избежание загрязнения кристаллитов при термообработке кварца нами были разработаны специальные технологические приемы, снижающие диффузионную подвижность примесей в демпферных зонах. Они основаны на энергетическом воздействии на кварц, которое вызывает коагуляцию атомов рассеянных примесей и потерю ими диффузионной активности.

Установлено, что подобная “нейтрализация” рассеянных примесей может осуществляться путем облучения кварца электромагнитным полем СВЧ-диапазона [12]. Как показали экспериментальные исследования, введение операции СВЧ-обработки приводит к замедлению роста концентрации изоморфных примесей в кварце при его нагревании. Степень этого замедления зависит как от свойств самого кварцевого сырья, так и режима облучения. Нахождение параметров облучения, при которых достигается максимальное снижение диффузионной подвижности рассеянных примесей в демпферных зонах, является одним из необходимых элементов оценки кварцевого сырья.

В табл. 2 приведены результаты изучения воздействия СВЧ на поведение рассеянных примесей в образцах кварцевого сырья месторождений Фенькина Лампи и Рухнаволок при высокотемпературном прогреве.

Таблица 2

Влияние обработки СВЧ на рост концентрации изоморфных примесей в кварце после прогрева

Образец	Тип изоморфной примеси	Исходное содержание примеси, ppm	Содержание в прогретом при 900°С кварце, ppm	Содержание в облученном СВЧ и прогретом при 900°С кварце, ppm
Жильный кварц, Фенькина Лампи (обр Ф-90)	Al	3,2	12	7,0
Жильный перекристаллизованный кварц, Рухнаволок (обр РХ-100)	Al^-	9,0	17	13
	Ti	1,5	3,0	2,1

Рассмотрение табл. 2 показывает, что введение операции СВЧ-обработки заметно снижает содержание изоморфных примесей в прогретом при 900 °С кварце.

Структурные характеристики кварца

Детали кристаллического строения имеют особое значение для технологических свойств кварца, поскольку определяют такие важные характеристики как предел обогатимости сырья, скорость растворения в плавиковой кислоте, температуру плавления кварца и т. д.

Результаты исследований кристаллической структуры кварца Карело-Кольского региона, проведенных методом ЭПР, помещены в табл. 3. Для сравнения в ней приведены данные изучения образцов кварца двух уральских месторождений: Кузнечихинское и Новотроицкое.

Таблица 3

Структурные характеристики исследованных образцов кварцевого сырья

№ п/п	Месторождение, рудопроявление	Разновидность кварца	Число образцов	N_{Al}, ppm	N_{Ti}, ppm	D
1	Фенькина Лампи	Жильный, молочно-белый	16	6,5÷22 / 11	<0,1	0,51÷0,31 / 0,40
2	Меломайс	Жильный, молочно-белый	10	6,5÷12 / 9,0	<0,1	0,59÷0,39 / 0,51
3	Рухнаволок	Жильный, перекристаллизованный	4	8,5÷41 / 20	0,9÷3,8 / 2,4	0,72÷0,60 / 0,64
4	Степаново озеро	Сливные кварциты	8	6,5÷8,5 / 7,0	<0,1÷1,2 / 0,3	0,53÷0,31 / 0,44
5	Кузнечихинское	Жильный	2	4,4÷4,6 / 4,5	<0,1	0,81÷0,68 / 0,75
6	Новотроицкое	Жильный	3	2,6÷5,0 / 3,6	<0,1	0,35÷0,24 / 0,29

Обращает на себя внимание, что во всех исследованных образцах кварца Карелии присутствует примесь структурного Al. Самые высокие его содержания отмечаются в перекристаллизованном кварце проявления Рухнаволок, а наименьшие значения N_{Al} наблюдаются в сливных кварцитах Степаново озеро и жильном кварце месторождения Меломайс. В целом уровень концентраций структурного Al в кварце Карелии несколько превышает уровень уральских месторождений.

Однако по содержанию структурного Ti в кварце месторождения этих регионов различаются незначительно. В обоих случаях величина N_{Ti} обычно не превышает порога обнаружения, равного 0,1 ppm. Только в кварце проявления Рухнаволок и в некоторых образцах кварцитов Степаново озеро установлены повышенные концентрации структурного Ti.

Степень кристалличности D отвечает степени упорядоченности кристаллической структуры кварца и характеризует ее способность противостоять воздействию кислотной среды в процессе обогащения. Значения степени кристалличности могут варьировать от нуля до единицы. Малые величины D отвечают низким степеням кристалличности, а большие – высоким, т. е. наиболее совершенной кристаллической структуре кварца. Чем выше значение D, тем меньшие потери кремнезема можно ожидать при высокотемпературном хлорировании кварцевого сырья. Поэтому высокая степень кристалличности кварца является благоприятным фактором для технологии его обогащения.

В соответствие с этим, качественное кварцевое сырье должно характеризоваться минимальными значениями N_{Al} и N_{Ti} и максимальной величиной D. Приведенный ниже график дает возможность выбрать образцы кварцевого сырья Карелии, наиболее перспективные для обогащения.

Для месторождений Фенькина Лампи, Меломайс и проявления Рухнаволок им соответствуют точки, лежащие на левом краю графиков $N_{Al}(D)$. Эти образцы содержат наименьшее количество структурных примесей и имеют сравнительно упорядоченную кристаллическую структуру. Причем для всех образцов кварца наблюдается постепенное уменьшение значений D с ростом содержания структурного Al, что свойственно поздней стадии динамической рекристаллизации.

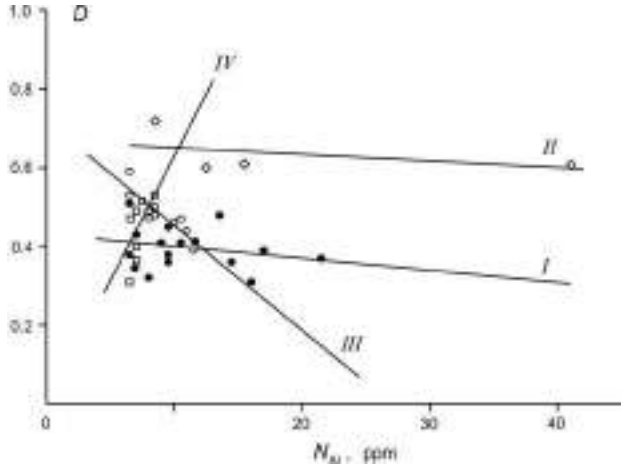


Рис. 6. Графики зависимости $N_{Al}(D)$ для образцов кварца Карельского региона: I – Фенькина Лампи; II – Рухнаволок; III – Меломайс; IV – Степаново озеро

График зависимости $N_{Al}(D)$ для сливных кварцитов Степаново озеро имеет обратный угол наклона по сравнению с рассмотренными выше графиками. Это свидетельствует о том, что кварциты претерпевают начальный этап динамической рекристаллизации. Поэтому более высокими технологическими свойствами обладают образцы, для которых точки располагаются в правой части графика зависимости $N_{Al}(D)$.

Таким образом, анализ графиков зависимости на рис. 6 дает возможность выбрать наиболее перспективные участки рассматриваемых месторождений Карельского региона. Для кварца Фенькина Лампи, Меломайс, Рухнаволок и кварцитов Степаново озеро они отвечают различным частям графиков $N_{Al}(D)$.

Результаты обогащения кварца Карело-Кольского региона с СВЧ-обработкой

Согласно полученным данным были поставлены эксперименты по улучшению качества концентратов с использованием операции СВЧ-обработки. Выбор режима облучения СВЧ подбирался с таким расчетом, чтобы, с одной стороны, исключить проникновения рассеянных примесей из демпферных зон в кристаллиты, а, с другой, – обеспечить их коагуляцию в этих зонах, откуда они могут быть удалены в результате травления в кислотах. Для достижения указанных целей определялась оптимальная интенсивность облучения кварца полем СВЧ и его продолжительность.

Установлено, что оптимальными для обогащения кварца ряда месторождений являются уровень микроволновой мощности – 700–800 Вт, а время облучения порядка 3–5мин. Результаты глубокого обогащения кварца месторождений Меломайс и Майское в оптимальном режиме (с предварительной сортировкой, СВЧ-обработкой и термообработкой) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Содержание примесей в образцах кварца месторождений Меломайс и Майское после глубокого обогащения с СВЧ-обработкой (мг/кг)

Месторождение, проявление	Fe	Ti	Zr	Al	Mn	Sr	Zn	B	Mg	Ca	Ba	Ni	Cr	Cu	K	Na	Li	Ge	P	Co	Сумма
Меломайс	0,8	4,9	0,63	17	0,01	0,086	0,01	0,07	0,36	1,5	0,13	0,01	0,024	0,045	3	2,6	0,4	0,11	0,1	0,012	31,801
Майское	0,33	0,2	0,015	5,8	0,01	0,082	0,014	0,15	0,2;	2,2	0,13	<0,01	<0,01	0,013	1,9	10,	0,14	0,18	<0,1	<0,01	20,959

Видно, что основными примесными элементами в обогащенных образцах кварца обоих месторождений остаются Al, K, Na, Ca, а в кварце Меломайс дополнительно наблюдается повышенное содержание Ti. Дальнейшее изучение структурных свойств исследованного кварца позволит разработать способы устранения этих примесей и получать концентраты более высокого качества. При этом нужно брать в расчет, что режим обработки специфичен для каждого месторождения.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что при оценке перспективности кварцевого сырья необходимо принимать во внимание стадийность динамической рекристаллизации кварца в природных условиях. Этот фактор на различных этапах минералообразования может играть как положительную, так и отрицательную роль. Его влияние отражается на состоянии кристаллической структуры кварца, которое следует учитывать при разработке эффективных технологий его обогащения.

Работа выполнена в рамках темы П4 – Программа «Месторождения стратегического сырья в России: инновационные подходы к их прогнозированию, оценке и добыче». Раздел 1.19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раков Л. Т. Механизмы изоморфизма в кварце // Геохимия. 2006. № 10. С. 1085−1096.
2. Раков Л. Т., Прокофьев В. Ю., Дубинчук В. Т. Связь изоморфизма с динамической рекристаллизацией кварца // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2016): Материалы минералогического семинара с международным участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С. 61–63.
3. Stipp M., Stunitz H., Heilbronner R., Schmid S. M. The eastern Tonale fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700ºC // J. of Structural Geology. 2002. V. 24. P. 1861−1884.
4. Stipp M. The range of dynamic recrystallization of quartz – An updated correlation between nature and experiment // Geophysical Research Abstracts. Vol. 16, EGU2014–12521, 2014.
5. Данилевская Л. А. Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии. Изд. КарНЦ РАН. 2004. 203 с.
6. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Повышение качества концентратов из молочно-белого жильного кварца // Обогащение руд. 2009. № 5. С. 21–25.
7. Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А. Выбор методов обогащения кварца на основе закономерностей распределения и форм нахождения в нем примесей (на примере участков Меломайс и Фенькина Лампи) // Новые методы технологической минералогии при оценке рудных металлов и промышленных минералов. Петрозаводск: Изд. КарНЦ РАН, 2009. С. 83–94.
8. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Месторождение жильного кварца Перчатка: История освоения, геолого-минералогические особенности, новые подходы к оценке сырья // Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова. Труды VII Всероссийской Ферсмановской научной сессии. Апатиты: Изд. K&M, 2010. С. 39–44.
9. Данилевская Л. А. Потенциал Республики Карелия в освоении ресурсов кварцевого сырья // Горный журнал. 2012. № 5. С. 22–25.
10. Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Физика процессов обогащения кварцевого сырья // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Сб. научных статей по материалам IV Российского семинара по технологической минералогии. 2010. Петрозаводск. ИГ КарНЦ. С. 103–108.
11. Раков Л. Т., Щипцов В. В., Дубинчук В. Т., Скамницкая Л. С. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: о природе образования и генетическом значении субмикроскопических структурных неоднородностей в кварце // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 164−180.
12. Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А., Щипцов В. В., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т. Способ оценки качества кварцевого сырья // Патент РФ № 2525681. Опубликовано 20. 08. 2014. Бюл. № 23.

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ ПОРОД НИГОЗЕРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Первунина А. В., Мясникова О. В.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Шунгитсодержащие породы Карелии развиты преимущественно в пределах Онежской палеопротерозойской структуры в составе людиковийского (1920 – 2100 млн. лет) и калевийского (1800–1920 млн. лет) надгоризонтов [1]. Шунгитовое вещество (ШВ), входящее в состав пород – это протерозойское органическое вещество в предграфитовой стадии углефикации (метаморфизма) [2]. Наиболее распространенной формой нахождения ШВ являются тонкодисперсные включения в основной массе пород кварц-серицит-хлоритового, серицит-хлоритового и карбонатного составов. ШВ также концентрируется в виде тонких (0,01 – 0,1 мм) ветвящихся прожилков. Структура ШВ – колломорфная и кристаллитовая. В шунгитсодержащих породах различного возраста и генезиса содержание ШВ колеблется от 0,1 % до 80 % [2].

Существует несколько классификаций шунгитсодержащих пород Карелии. Впервые А. А. Иностранцев [3] разделил шунгиты на четыре разновидности, основываясь на различии физических свойств. В дальнейшем, классификация шунгитсодержащих пород разрабатывалась в зависимости от цели и задач исследований. На сегодняшний день известно четыре варианта разделения шунгитсодержащих пород.

По минеральному составу шунгитсодержащие породы подразделяются на кремнистые (лидиты), карбонатные (известняки, доломиты), гли-

нистые (алевролиты) и вулканогенно-осадочные (туфопесчаники, туфоалевролиты, туфопелиты).

К рассматриваемым в работе низкоуглеродистым породам Нигозерского месторождения, согласно классификации М. М. Филиппова [4], относятся породы с силикатной минеральной основой и переотложенным органическим веществом в составе терригенных частиц. Содержание ШВ колеблется в пределах от 0,5 до 2,5 %, максимальное количество содержится в тонкоразмерных породах – аргиллитах и алевролитах, минимальное – в песчаниках.

Нигозерское месторождение шунгитсодержащих пород расположено в Кондопожском районе Республики Карелия, в 1–1,5 км на восток от г. Кондопога и в 2 км на северо-восток от северной оконечности Кондопожской губы Онежского озера (рис. 1).

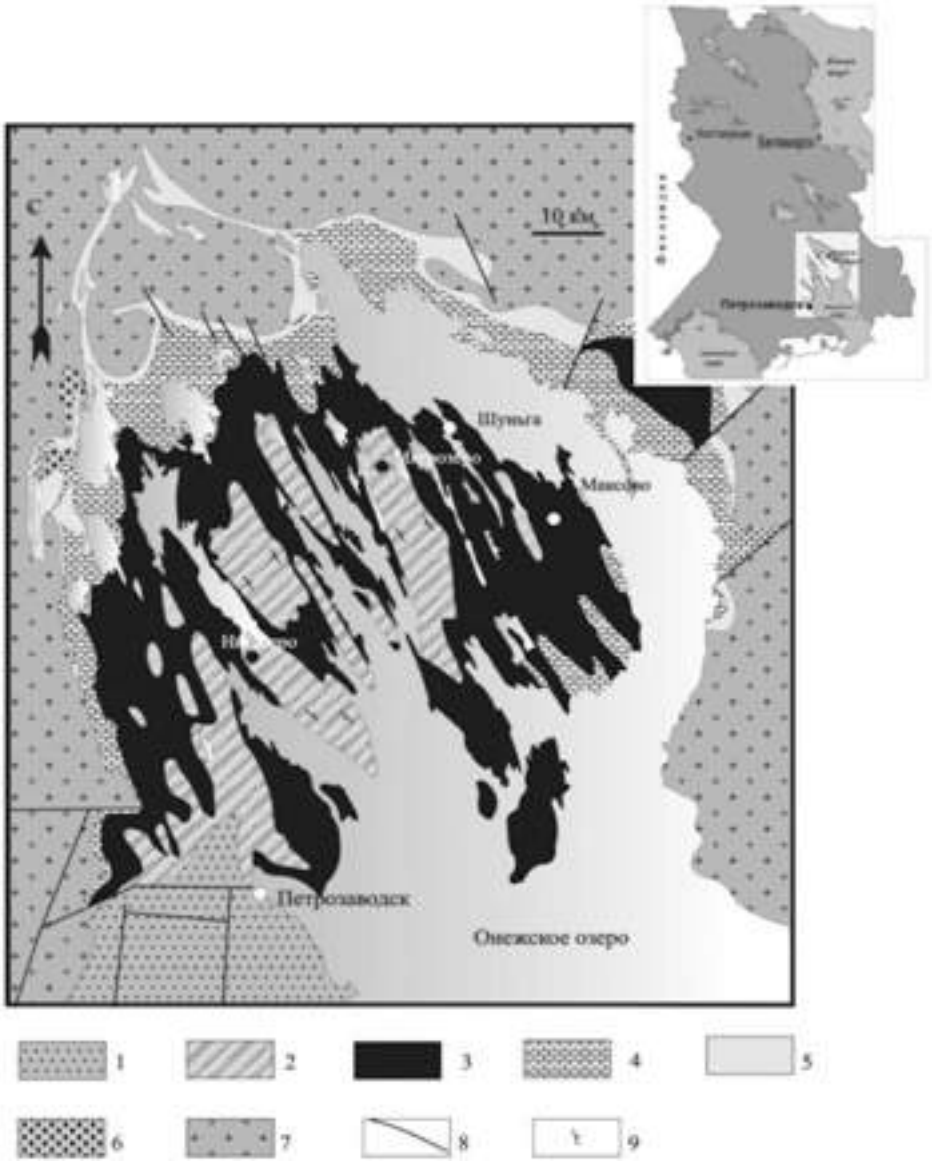


Рис. 1. Геологическая схема Онежской структуры [5]

1 – вепсийский надгоризонт; 2 – калевийский надгоризонт; 3 – людиковийский, ятулийский; надгоризонты; 4 – онежский горизонт; 5 – сегозерский горизонт; 6 – сариолийский надгоризонт; 7 – архейский фундамент; 8 – разрывные нарушения; 9 – элементы залегания слоистости

В структурном отношении месторождение приурочено к северо-западной замковой части Вашозерской синклинали. Породы Нигозерского месторождения представлены пологолежащей линзой переслаивающихся шунгитсодержащих аргиллитов, алевролитов и песчаников калевийского надгоризонта. Породы имеют горизонтальное (1–7°) залегание с погружением на юго-запад. Осложнены рядом мелких пологих складок с северо-западным простиранием осей [6].

Породы продуктивной толщи Нигозерского месторождения метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. Практически все первичные глинистые минералы замещены хлоритом. В том или ином количестве присутствует туфовый материал.

В вертикальном разрезе и по площади месторождения содержание ШВ постепенно уменьшается в восточном – юго-восточном направлении, что выражается в заметном осветлении пород. Наиболее распространенная форма нахождения ШВ в породах – равномерно-распыленная вкрапленность размером от 1 до 10 микрон. Часто ШВ образует вытянутые по слоистости линзы мощностью до 0,05 мм.

Проведенными ранее работами на месторождении установлена система разломов северо-западного и северо-восточного простирания [7, 8]. Наиболее крупное нарушение выявлено в центральной части месторождения – простирание С3–340°, падение близко к вертикальному. Разломы сопровождаются зонами интенсивной трещиноватости, в которых происходит окисление пород. Результатом такого процесса является переход двухвалентного железа в трехвалентное состояние (лимонитизация основной массы пород) и вынос ШВ. При этом породы приобретают бурую или желтоватую окраску. Повсеместно в песчаниках месторождения встречаются проявления медной минерализации – медная зелень и примазки хризоколлы.

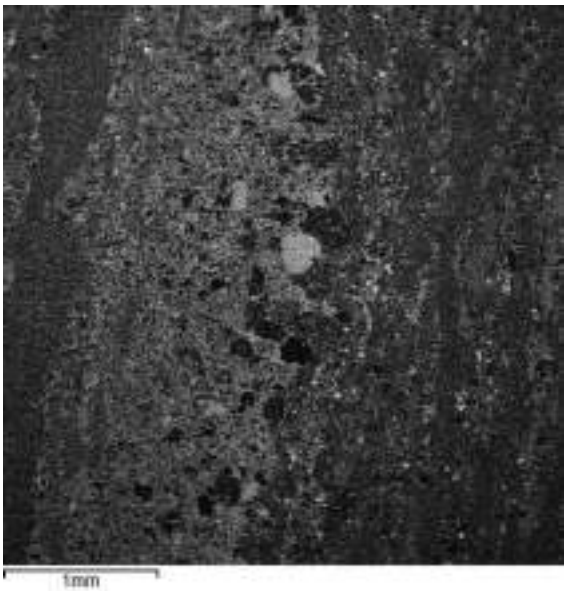
Неизмененные разности песчаников имеют серую, темно-серую, буро-зеленоватую, редко черную окраску. Прослои мощностью от 1 см до 20 см встречаются по всей продуктивной толще. Изучение пород с применением системы рентгеновского энерго-дисперсионного микроанализа Oxford INCA Energy350, интегрированного с электронным микроскопом VEGA II LSH выявило следующие особенности. Обломочный материал представлен преимущественно хлоритом, полевым шпатом. Окатанность зерен – средняя, встречаются угловатые обломки. Структура пород бластопсаммитовая. Текстура – массивная, полосчатая, отмечается параллельная горизонтальная, реже косая слоистость. Цемент основной массы кварц-альбит хлоритового и альбит-хлоритового состава. Главные породообразующие минералы – хлорит (36–65 %), плагиоклаз-альбит (10–20 %), кварц (1–3 %), карбонат (до 3 %) и шунгитовое вещество (до 2,5 %). Наибольшее значение в количественном отношении имеет хлорит, который совместно с гидрослюдами образует раскристаллизованную массу, замещающую почти полностью первичные глинистые минералы. Вторичные минералы – карбонат и лимонит, акцессорные – апатит, титанит, рутил (рис. 2).

Глинистые алевролиты и аргиллиты по сравнению с песчаниками имеют более светлую окраску, от темно-серой до серой. Зерна, как правило, плохо окатанные, нередко угловатые. Обломочный материал представлен кварцем, полевым шпатом, тонкозернистым хлоритовым агрегатом, реже встречаются карбонатные зерна. Структура пород бластоалевропелитовая. Текстура – слоистая, неяснослоистая, реже массивная. Главные породообразующие минералы – хлорит 40 % (иногда до 72 %), плагиоклаз–альбит (15–25 %), кварц (2–4 %), шунгитовое вещество (до 4 %), карбонат (1–5 %). Вторичные минералы: лимонит, ярозит, карбонат. Акцессорные минералы: сфен, мусковит, апатит, рудный (халькозин, халькопирит, окислы Fe, V, Cu) (рис. 3).

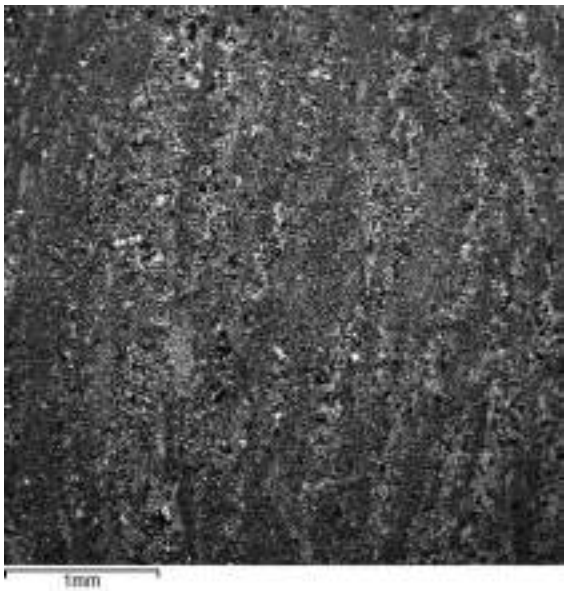
По данным рентгенофлюоресцентного спектрального анализа на спектрометре ARL ADVANT'X – 2331 шунгитсодержащие песчаники и алевролиты отличаются неоднородным петрохимическим составом (табл. 1).

Детальное рассмотрение вариаций петрохимических элементов в песчаниках и алевролитах Нигозерского месторождения позволило выделить характерные особенности: колебание содержаний компонентов (масс. %) по отдельным пробам находится в пределах 4–12 %; Состав песчаников и алевролитов отличается только по гранулометрии. Среднее значение отношения SiO_2/Al_2O_3 в пробах песчаника и алевролита имеет значение 3,02, что указывает на песчано-глинистую природу осадков. Высокое значение среднего показателя титанового модуля (Al_2O_3/TiO_2) в песчанике – 9,22 и алевролите – 8,93 подтверждает, что первичный осадок образовался преимущественно за счет продуктов разрушения пород основного состава [8].

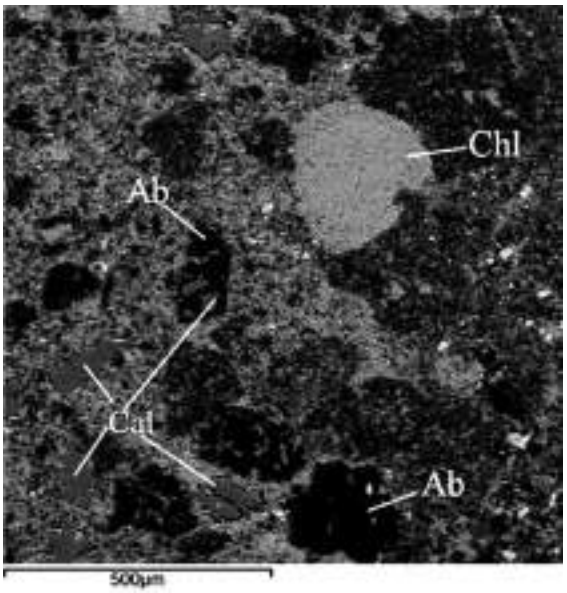
В целом для пород продуктивной толщи характерно сходство химического состава с химическим составом основных магматических пород группы габбробазальта; к отличиям можно отнести повышенное содержание Fe_2O_3, которое достигает 21 %. Очевидно, что основным носителем железа в породах является железистый хлорит (рис. 4).



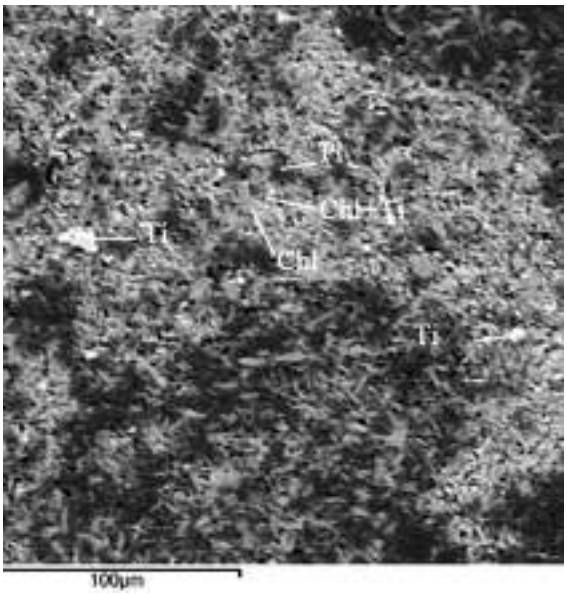
а



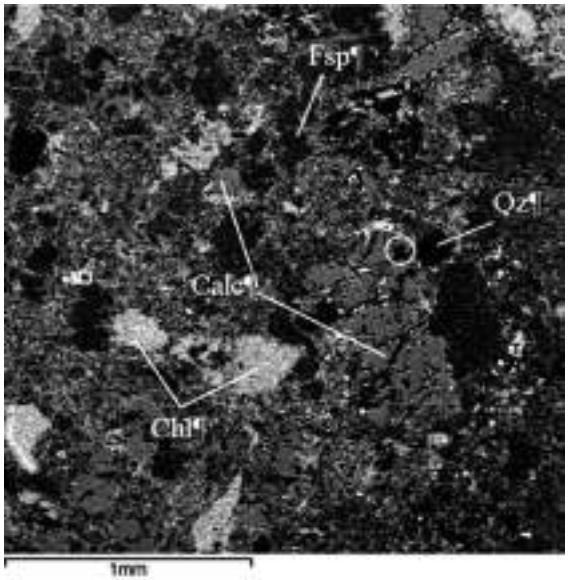
б



в



г



д

Рис. 2. Шунгитсодержащий песчаник Нигозерского месторождения: а, б – полосчатая текстура в шунгитсодержащих песчаниках Нигозерского месторождения; в – альбит-кальцит-хлоритовая ассоциация; г, д – участок мелкодисперсной альбит-хлоритовой ассоциации. Vega INCA Energy-350, Teskan Oxford

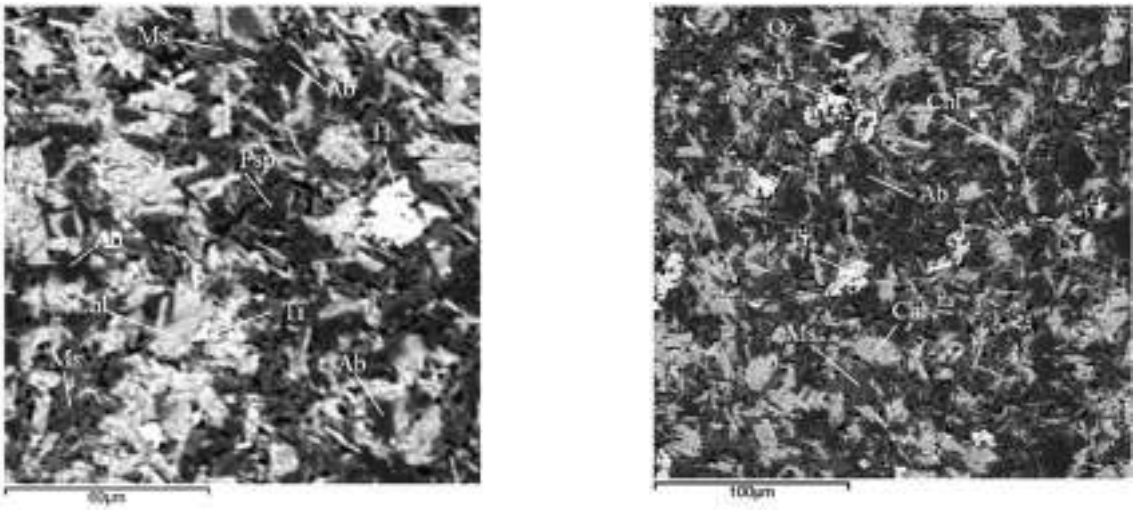


Рис. 3. Шунгитсодержащий алевролит Нигозерского месторождения.
Vega INCA Energy-350, Teskan Oxford

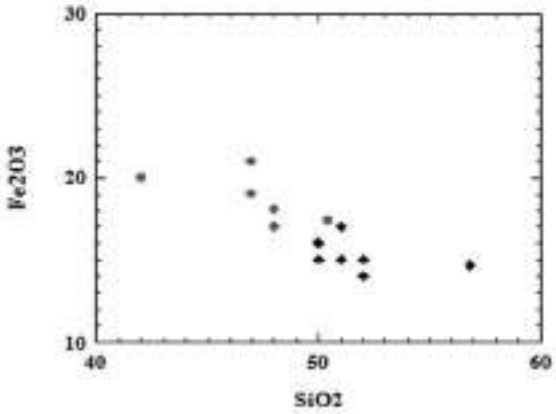


Рис. 4. Содержание Fe2O3 в алевролитах (кружок) и песчаниках (ромб) Нигозерского месторождения

Традиционно низкоуглеродистые породы Нигозерского месторождения применялись в строительной индустрии для получения легкого пористого заполнителя бетона – шунгизита. Первая промышленная разработка низкоуглеродистых пород месторождения началась в 1972 г., запасы которого по категориям А+В+С1 составляли 17,4 млн. м^3. После отработки верхних продуктивных горизонтов месторождения до ниже лежащих пластов карьера и разработке измененных пород в зонах тектонических нарушений, произошло значительное ухудшение качества минерального сырья для производства шунгизита. Сплошная выемка таких пород, без предварительной сортировки сырья, не дает возможности получить шунгизитовый гравий фракции 10–20 мм стабильного качества с постоянной насыпной плотностью 350 кг/м^3 (I сорт). Насыпная плотность шунгизита изменяется в широком диапазоне от 350 до 700 кг/м^3, гравий неоднороден по плотности гранул в пределах одной партии. В составе пород месторождения наблюдается постепенное уменьшение процентного содержания ШВ в юго-восточном направлении. С потерей ШВ породы утрачивают способность вспучиваться [9].

Повышенные требования к качеству строительных материалов в настоящее время, предопределили снижение, а затем и потерю интереса к низкоуглеродистым породам Нигозерского месторождения, как сырью для получения шунгизита. Для дальнейшего функционирования месторождения назрела потребность в изучении состава и свойств низкоуглеродистых пород как нерудных полезных ископаемых для производства щебня, бута. Свойства низкоуглеродистых пород, как строительного камня, зависят от минералогического состава и структурно-текстурных особенностей строения, которые определяются генезисом пород и интенсивностью вторичных процессов, а также горнотехническими условиями добычи и способами последующего технологического передела.

Для решения этой задачи на Нигозерском месторождении были отобраны пробы двух характерных типов углеродсодержащих пород отличающихся по гранулометрическому составу: песчаники и алевролиты.

Исследование физико-механических свойств низкоуглеродистых песчаников и алевролитов месторождения проводились на образцах правильной кубической формы и представлено в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав низкоуглеродистых пород Нигозерского месторождения, масс. %

Горная порода	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3 (общ.)	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	п.п.п.	H_2O	SO_3
Алевролит	42,70–50,94	1,72–2,62	13,20–18,99	16,84–21,21	1,19–3,40	3,47–5,52	0,34–2,38	1,48–2,60	3,68–6,80	0,08–0,20	0,01–0,02
Песчаник	49,02–56,83	1,67–2,03	14,66–17,76	14,68–18,23	1,69–6,24	2,94–6,36	0,90–2,50	1,52–2,30	4,11–5,72	0,04–0,51	0,01–0,13
Переслаивание аргиллитов, алевролитов и песчаников [6]	42,70–53,83	1,68–2,62	13,20–18,50	14,72–21,21	1,12–4,70	1,12–4,70	0,30–2,50	1,48–4,40	2,76–6,80	0,00–0,57	0,00–0,19

Таблица 2

Физико-механические свойства низкоуглеродистых пород Нигозерского месторождения

Показатель	Единицы измерения	Песчаники	Алевролиты
Плотность (объемная масса)	кг/м^3	2790–2880 2830	2850–2900 2870
Истинная плотность (удельная масса)	кг/м^3	2870–2890 2880	2880–2880 2880
Пористость	%	1,74	0,35
Предел прочности при сжатии в сухом состоянии в направлении ⊥ слоистости	МПа	169–253 202	101–154 125
Предел прочности при сжатии в сухом состоянии в направлении слоистости	МПа	100–121 107	93–146 117
Коэффициент анизотропии предела прочности в сухом состоянии ()	%	52,97	93,60
Микротвердость	кГ/мм^2	720–824 альбит 322–383 хлорит 946–1209 кварц 116–206 карбонаты	724 альбит 315–378 хлорит 143 карбонаты

По прочностным свойствам песчаники и алевролиты характеризуются высоким значением предела прочности при одноосном сжатии. Для песчаников характерна анизотропия прочности – показатель анизотропии 52,97 % и более высокие значения пористости, что связано с гранулометрическим составом и слоистой текстурой породы. По значению микротвердости песчаники и алевролиты относятся к среднетвердым породам – основным породообразующим минералом является хлорит, содержание которого в песчаниках – 36–65 %, в алевролитах 40–72 %. Несмотря на высокие прочностные свойства песчаников и алевролитов, наличие мощных зон тектонических нарушений, осложненных оперяющими трещинами не позволяет проводить добычу промышленных блоков на месторождении.

Добыча горной массы для производства щебня из низкоуглеродистых пород месторождения осуществлялась буровзрывным способам, методом скважинных зарядов. Технологический передел горной массы на щебень до 2006 г. предусматривал трехстадиальное дробление, с применением на I стадии щековой дробилки СМД-111, на II и III стадиях – конусных дробилок КСД–1750 с сортировкой на грохотах ГИЛ-2 и ГИЛ-52А. Недостатком такой схемы дробления являлось высокое содержание зерен пластинчатой и игловатой формы в готовой продукции (щебне), по данным [10] щебень фракции 20–40 мм характеризовался по лещадности II-IV группой. Такие показатели существенно снижали качество готовой продукции (щебня) и затрудняли его реализацию.

Для снижения показателя лещадности щебня и увеличения производительности с 2006 года на месторождении введен в эксплуатацию передвижной дробильно-сортировочный комплекс «TEREX FINLAY». I стадия дробления включает щековую дробилку «TEREX Finlay J-1175 Crusher» со встроенным грохотом. Максимальный размер материала дробления –650 мм. На II стадии дробления применяется роторная дробильная установка «TEREX FINLAY I-1312 Impactor». В роторных дробилках реализуется ударный механизм разрушения

материала, т. е. применяется принцип дробления «камень о камень». При соударении кусков породы разрушаются самые слабые куски, имеющие пластинчатую или игловатую форму. Данные дробилки обладают селективным разрушением породы и обеспечивают выход продукции оптимальной (кубовидной) формы, имеют меньший удельный расход электроэнергии, большую производительность, простоту конструкции и удобство обслуживания по сравнению со щековыми и конусными дробилками. Сортировка после II стадии дробления осуществляется на наклонном грохоте «TEREX FINLAY 694+ Supertrak». Трехдековая конфигурация грохота включает три полноразмерных деки. Гидравлически складываемый четвертый конвейер с функцией регулировки углов наклона и поворота, позволяет точно распределять конечный продукт либо в закрыты контур на дробилке, либо в отвал.

Выход щебня по фракциям, по выше приведенной технологической схеме, составляет: 5–20 мм –45,8 %; 20–40 мм –29,8 %; отсевы 0–5 мм –24,4 %.

Авторами были отобраны технологические пробы фракций щебня, выпускаемого из пород продуктивной толщи Нигозерского месторождения, и проведены исследования их физико-механических свойств (табл. 3).

Таблица 3

Физико-механические свойства щебня Нигозерского месторождения

Наименование испытания	Единицы измерения	Фактический результат	Требования ГОСТ 8267-93
Прочность: 1. дробимость при сжатии в цилиндре в водонасыщенном состоянии фр. 5–20 мм фр 20–40 мм	% по массе	9,47 10,73	до 11 включ.
2. истираемость в полочном барабане фр. 5–20 мм фр 20–40 мм	% по массе	13,00 12,7	до 25 включ.
Содержание в щебне: зерен пластинчатой и игловатой формы фр. 5 – 20 мм фр 20 – 40 мм	% по массе	8,50 5,05	до 10 включ.
зерен слабых пород фр. 5–20 мм фр. 20–40 мм	% по массе	1,44 нет	не более 5 при марке по дробимости 1200
пылевидных и глинистых частиц (размер менее 0,05 мм) фр. 5–20 мм фр. 20–40 мм	% по массе	0,18 0,13	не более 2 при марке по дробимости 1200
Насыпная плотность: фр. 5–20 мм фр. 20–40 мм	кг/м^3	1242 1280	
Суммарная удельная эффективная активность естественных радионуклидов ($A_{эфф.}$)	Бк/кг	129	до 370 во вновь строящихся жилых и общественных зданиях

По прочности щебень относится к категории прочного щебня: дробимость – 1200, истираемость И 1; по показателю лещадности к 1 группе; радиационно-гигиеническая оценка ($A_{эфф.}$ <370 Бк/кг) позволяет применять во вновь строящихся жилых и общественных зданиях.

Можно отметить, что качественные характеристики щебня из продуктивных горизонтов месторождения (в основном песчаников) в целом достаточно высоки и щебень может применяться в качестве заполнителей для тяжелого бетона и других видов строительства. Однако следует обратить внимание на наличие вредных примесей, которые снижают прочность и долговечность бетона, т. е. необходимо контролировать содержание сульфидов, хлоритов и халькопирита в щебне, указывать их значение в сертификате продукции. Пески-отсевы могут применяться для строительных растворов, приготовления сухих смесей.

Для алевролитов Нигозерского месторождения характерна плитчатая отдельность параллельная слоистости, вследствие чего алевролиты легко раскалываются на плитки толщиной 2–15 см. Породы хорошо поддаются шлифовке, приобре-

тают однотонный матовый черный цвет. В основном, применяются в виде плиток-отдельностей для мощения полов, различных архитектурно-садовых форм, облицовки внешних фасадов зданий, внутренней отделки интерьеров.

Таким образом, учитывая тектоническое районирование Нигозерского месторождения, целесообразно его дальнейшее комплексное освоение. Для добычи нижележащих горизонтов песчаников на щебень необходимо проводить вскрышные работы с отработкой алевролитов, например, на плитки-отдельности.

Работа выполнена в рамках тем НИР ПФНИ ГАН «Геология и минералогия шунгитовых пород, технология их использования» (№ госрег. АААА-А16–116020410112–1) и «Научное обоснование потенциала георесурсов нетрадиционных и новых промышленных минералов и горных пород Карелии при их комплексной оценке» (№ госрег. АААА-А16–116020410115–2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка, Россия, Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 13 с.
2. Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинория / Редакторы М. М. Филиппов, В. А. Мележик. Петрозаводск: «Скандинавия», 2006. 80 с.
3. Иностранцев А. А. Новый крайний член в ряду аморфного углерода // Горный журн. 1879. Т. 11. № 5–6. С. 314–342.
4. Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения) / Под редакцией М. М. Филиппова, А. И. Голубева. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1994. 207 с.
5. Горлов В. И. Онежские шунгиты / Дис. канд. г.-м. наук. Петрозаводск: 1984. 226 с.
6. Александров В. И. и др. Отчет по доразведке Нигозерского месторождения шунгитсодержащих пород в Кондопожском районе КАССР в 1969–72 г. г. 1972 / ТФГИ по СЗ РФ Инв. СПб. № 4048.
7. Соколов С. Я. Геофизические методы картирования тектонических нарушений на месторождениях вспучивающихся шунгитсодержащих сланцев // Шунгитовые породы Карелии. Петрозаводск, 1981. С. 58–67.
8. Филиппов М. М. Нигозерские сланцы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 469 с.
9. Калинин Ю. К. Опробование на вспучиваемость шунгитовых сланцев Нигозерского месторождения. 1964 / ТФГИ по СЗ РФ Инв. СПб. № 2401.
10. Быстров А. Ф. Отчет о результатах разведочных работ (доразведка) на строительный камень на месторождении шунгитовых пород Нигозерское в Кондопожском р-не РК. 2007 / ТФГИ по СЗ РФ Инв. СПб. № 3472.

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЛЬТРАМАФИТОВ ПИРОКСЕНОВОГО СОСТАВА КАК ВЫСОКОМАГНЕЗИАЛЬНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Ильина В. П., Фролов П. В.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, Ilyina@igkrc.ru

Введение

Карелия располагает обширной минерально-сырьевой базой полезных ископаемых и значительными возможностями для ее развития. В рамках минералого-технологического изучения неметаллических полезных ископаемых была выполнена оценка ультрамафитов пироксенового состава как высокомагнезиального сырья. Прежде всего, рассмотрены попутные продукты горнорудных предприятий Карелии, содержащие силикаты магния, полученные в результате переработки рудных месторождений, в виде измельченной минеральной массы (порошка, песка, щебня). Такие техногенные продукты могут быть перспективным нетрадиционным сырьем для изготовления различных строительных материалов, в том числе изделий строительной облицовочной керамики, и способны заменить традиционные виды сырья в изделиях из малокомпонентных шихт. Основная задача прикладного минералогического исследования магнийсодержащих техногенных продуктов заключается в определении вещественного состава и влияния его на технологические свойства облицовочных строи-

тельных материалов, таких как водопоглощение, общую усадку, механическую прочность, в условиях низкотемпературного обжига, что позволит разработать основы технологии декоративно-отделочной керамики на базе данного вида нетрадиционного сырья.

Пироксениты Карелии входят в состав мафит-ультрамафитовых породных комплексов гранит-зеленокаменных областей Карельского кратона. Широкого практического применения пироксениты в настоящее время не получили. Разновидности пироксенитов, с соответствующими декоративными свойствами, могут использоваться в качестве облицовочного камня. Целью данной работы является исследование и сравнение вещественного состава пироксенитов разных месторождений: хромовых руд Аганозерское, блочного камня Сопка Бунтина, проявления полиминеральных руд Гайкольское, а также изучение влияния вещественного состава на технологические свойства – водопоглощение и усадку при одинаковых условиях обжига и составе шихты, что позволит дать предварительную оценку возможного использования пироксенитов в качестве высокомагнезиального минерального сырья для облицовочных строительных материалов.

Изучение вещественного состава пироксенитов

Практическое значение в Карелии имеют пироксениты расслоенных интрузий. В первую очередь, это крупный Бураковский массив (юго-восточная часть Карелии, Пудожский район), с которым связано Аганозерское хромовое, с попутными платиноидами, месторождение [2, 9]. Этот объект является, по сути, комплексным. Здесь может представлять интерес хромит как индустриальный минерал (а не только в качестве хромовых руд), потенциальными полезными ископаемыми являются также вмещающие серпентиниты (кемиститы) и пироксениты, объемы которых значительны [6, 7, 12]. Площадь Бураковского массива составляет 630 км^2 (50 км в длину и до 16 км в ширину). Возраст 2,445 млн. лет (нижний протерозой) [9]. В таблице 1 приведены химические составы пироксенитов, определенные методом рентгеноспектрального флюоресцентного анализа на приборе ARL Advant X. Пробы отобраны из пироксенитов коренных выходов (А-308, А-308–г, А-311) и керна скважины № 817 в северной части Аганозерской площади, вмещающих хромитовое оруденение Главного Хромитового Горизонта. Данные пробы отличаются по содержанию основных компонентов, – оксидов магния и кальция, и относятся к Ca-Mg пироксенитам.

Таблица 1

Химический состав пироксенитов Аганозера

Оксиды	№ пробы			
	А-308	А-308-г	А-311	817
SiO_2	50,50	49,80	47,40	50,63
TiO_2	0,26	0,28	0,27	0,27
Al_2O_3	1,50	1,05	1,57	3,24
Fe_2O_3	1,90	2,13	4,28	7,50
FeO	4,59	4,88	4,17	5,89
MnO	0,163	0. 146	0,183	0,157
MgO	21,80	23,37	22,54	18,00
CaO	15,30	14,21	12,05	14,90
Na_2O	0,37	0,33	0,35	0,60
K_2O	<0,01	<0,01	<0,02	<0,07
H_2O	0,47	0,35	1,14	0,26
П. п. п.	2,51	2,85	5,06	4,03
P_2O_5	0,05	0,03	0,05	0,03
Cr_2O_3	0,648	0,342	0,386	0,112
V_2O_5	0,059	0,056	0,044	0,037
CoO	0,009	0,007	0,008	0,007
NiO	0,139	0,134	0,164	0,126
CuO	0,002	0,002	0,007	0,070
ZnO	–	0,006	0,006	0,006
S	–	<0,01	0,041	0,10
CO_2	–	–	–	2,30
Сумма	100,07	99,97	99,69	99,93

Минеральный состав проб пироксенитов Аганозера (А-308, А-308-г, А-311, 817) определен методом микроанализа, выполненного с помощью электронного микроскопа VEGA 2 LSH с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350, при увеличении в пределах 150–1200 раз. На рисунке 1 приведено электронное изображение микроструктуры проб пироксенитов. Во всех пробах основными минералами пироксенового ряда являются авгит и энстатит, присутствуют оливин и редкие зерна хромита. Рентгенофазовый анализ пробы 308-г выполнен на автоматическом дифрактометре ARL X'Tra, – на Cukα излучении, в области углов 2 θ = 2°–90°, с шагом 0.02°, время набора импульсов 1 сек. Программа обработки экспериментальных данных – Win XRD. По результатам рентгенофазового анализа, выполненного в программе (Siroquant), и данным химического анализа установлено содержание основных минералов в пробе 308-г, в масс %: авгита – 67,2, форстерита – 4,3, энстатита – 23,7, серпентина – 4,8.

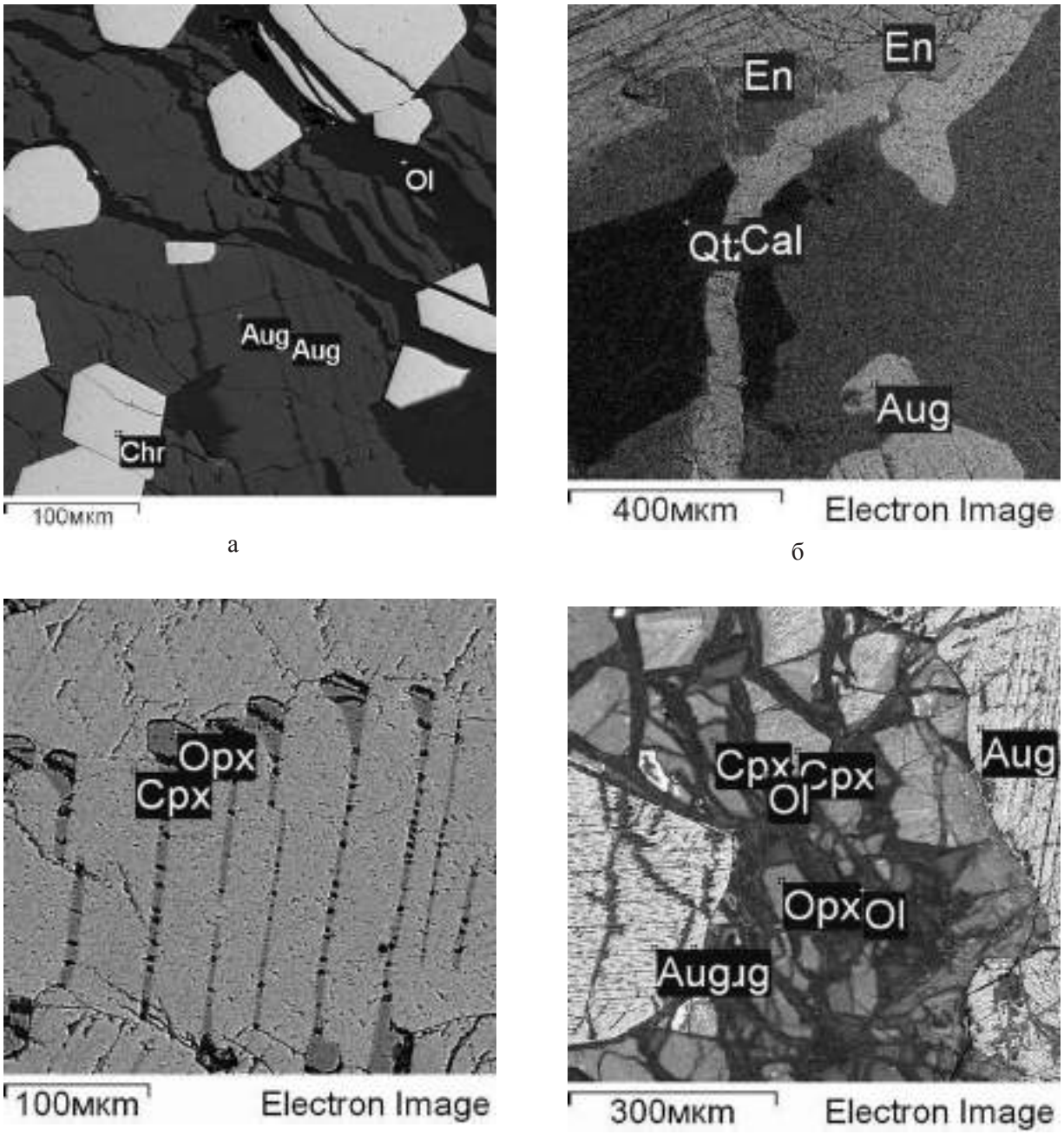


Рис. 1. Электронное изображение микроструктуры проб пироксенитов Аганозера: а-308–г, б-817, в-308, г-311 (Aug – авгит, Ol – оливин, Chr – хромит, Qtz – кварц, Cal – кальцит, En – энстатит, Opx – ортопироксен, Cpx – клинопироксен)

Гайкольский дифференцированный массив ультраосновных пород (Северная Карелия, Калевальский район) относится к суйсарскому габбро-перидотитовому комплексу (палеопротерозой). Представляет собой серию небольших дифференцированных тел ультраосновных пород дайкообразной, пластообразной и неправильной формы, осложненной разломами. Длина тел до 3,5 км, ширина до 0,9–1,0 км [3]. В строении их принимают участие (снизу вверх) пироксенитовые метаоливиниты, метаперидотиты-лерцолиты-верлиты, оливиновые и оливинсодержащие метапироксениты, полевошпатовые метапироксениты, габбро-нориты. Резко преобладают метаоливиниты и метаперидотиты. Главными породообразующими минералами являются оливин, моноклинный и ромбический пироксены, плагиоклаз. Рудные минералы представлены магнетитом, пирротином, халькопиритом, самородной медью. Как правило, породы почти пол-

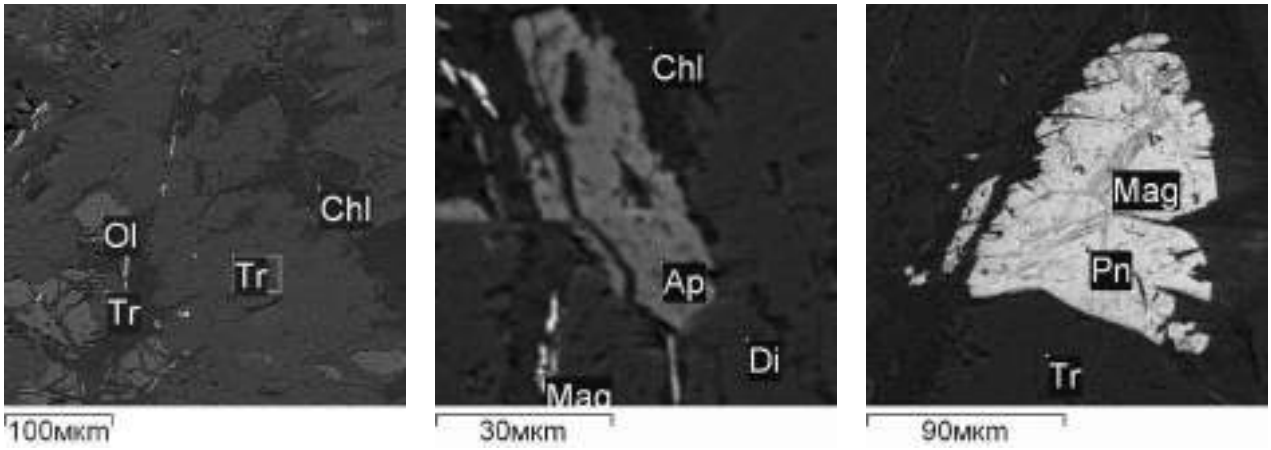
ностью изменены, – амфиболизация, серпентинизация, отальковане, карбонатизация, хлоритизация, пироксенизация. В таблице 2 дается химический состав пробы 1508/2 пироксенитов Гайколя. Для ранее отобранных проб пироксенитов характерно высокое содержание оксида магния 29,52–34,20 масс. % и оксидов железа (Fe_2O_3 + FeO) 8,92–12,27 масс. %, что соответствует Fe–Mg пироксенам. По результатам рентгенофазового анализа и данным химического анализа установлены основные минералы пробы 1508/2: оливин, тремолит, хлорит, серпентин.

На рисунке 2 приведена микроструктура пробы 1508/2 пироксенита Гайколя.

Таблица 2

Химический состав пироксенитов Гайколя

Проба	Оксиды											
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	H_2O	П. п. п.
1508/2	43,14	0,14	3,6	3,65	6,89	0,16	29,52	4,86	0,1	0,01	0,25	6,84



а б в

Рис. 2. Микроструктура пробы 1508/2 пироксенита проявления полиметаллических руд Гайколя (Ol – оливин, Chl – хлорит, Tr – тремолит, Mag – магнетит, Di – диопсид, Pn – пентландит)

По данным микроанализа, основные минералы пробы 1508/2 пироксенита Гайколя представлены оливином, хлоритом, тремолитом, из группы пироксенов присутствует диопсид, из рудных минералов – магнетит, пентландит.

Месторождение блочного камня Сопка Бунтина расположено в Лоухском районе (Северная Карелия). Разрабатывается компанией ЗАО ГПК «Кармин». Массив пироксенитов Сопка Бунтина приурочен к верхам хетоламбинской толщи беломорской серии.

Массив представлял собой расслоенную интрузию. Впоследствии породы массива были сильно метаморфизованы и превращены в гранатовые амфиболиты, где часто встречаются многочисленные реликты неизмененных пироксенитов. На рисунке 3 представлены пироксениты месторождения блочного камня Сопка Бунтина.

Методом оптической микроскопии установлено, что ультрамафиты Сопки Бунтина состоят из ромбического пироксена, оливина, амфибола, хлорита, карбоната, рудного минерала. Химический анализ выполнен на рентгенофлюоресцентном спектрометре ARL Advant 1X. Содержание компонентов в пробе СБ-1, масс. %: SiO_2 – 41,97; Al_2O_3 – 5,93; Fe_2O_3 общ. – 9,5; Na_2O – 0,17; CaO – 4,14; K_2O – 0,05; MgO – 29,84; MnO – 0,14; TiO_2 – 0,22; S – 0,09, п. п. п. – 7,98. Пироксениты Сопки Бунтина относятся к Fe-Mg пироксенам. По результатам рентгенофазового анализа, выполненного в программе Siroquant, и данным химического анализа установлено содержание основных минералов в технологической пробе СБ-1 пироксенита (в масс. %): тремолит – 26,4, хлорит – 14,1, энстатит (бронзит) – 43,7, доломит – 15,8.

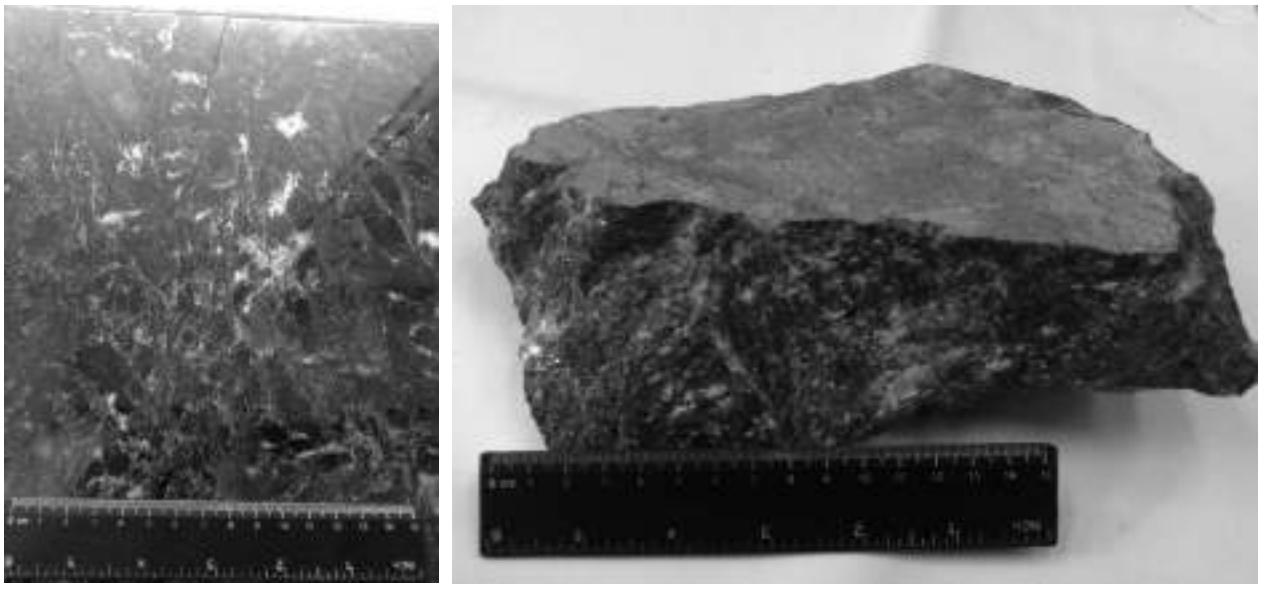
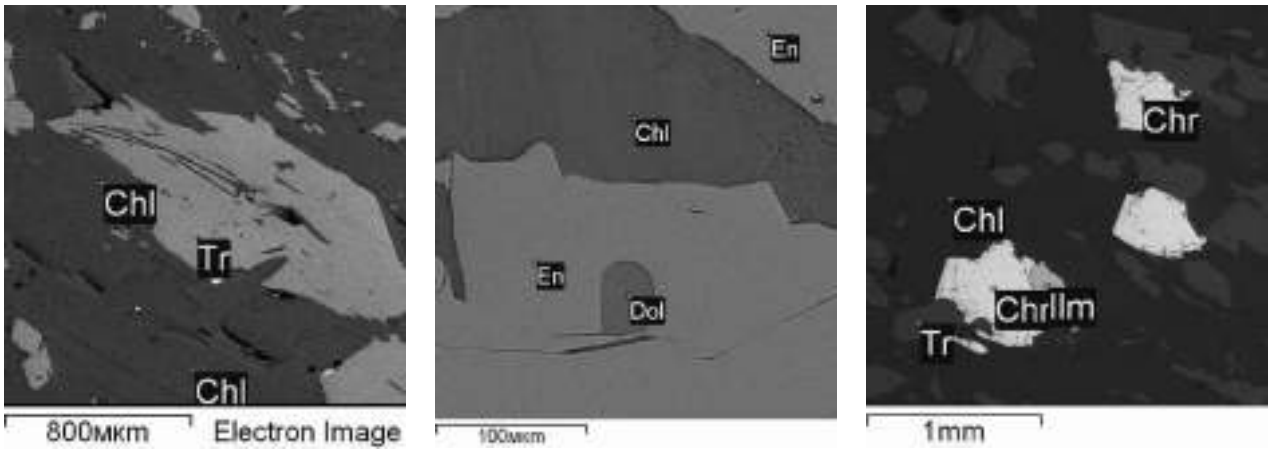


Рис. 3. Пироксениты месторождения блочного камня Сопка Бунтина (из коллекции Института геологии)

По данным микроанализа (рис. 4) основными минералами пробы пироксенита БС-1 являются минералы: из группы ромбических пироксенов – энстатит (бронзит), из группы амфиболов – тремолит, из минералов слоистой структуры – хлорит, из карбонатов – доломит, из рудных минералов – хромит, ильменит, а также оливин.

По минеральному составу ультрамафиты изучаемых объектов значительно отличаются по содержанию основных минералов. Основным минералом из группы пироксенов в исследованных пробах Аганозера является авгит, энстатит, проба 1508/2 Гайколя содержит диопсид, Сопки Бунтина – энстатит (бронзит). Кроме того, пробы содержат хлорит, оливин, тремолит, рудные минералы.



а б в

Рис. 4. Микроструктура пробы пироксенита СБ-1 месторождения блочного камня Сопка Бунтина (фрагменты одной пробы) (Chl – хлорит, Tr – тремолит, En – энстатит (бронзит), Dol – доломит, Chr – хромит, Ilm – ильменит)

Результаты технологических исследований

В условиях высокотемпературного обжига, входящие в состав пироксенитов минералы – тремолит, хлорит, серпентин, карбонаты кальция и магния, претерпевают фазовые превращения с образованием новых кристаллических фаз. Исследование поведения пироксенитов при нагревании от 900° С до 1250° С было выполнено на пробе 308–г Аганозера, при нагревании от 900 °С до 1100° С – на пробах пироксенитов Гайколя 1508/2 и Сопки Бунтина СБ-1. При нагревании от 900° С до 1250° С наблюдается изменение фазово-

го состава пироксенитов Аганозера: при 900°С, по данным рентгенофазового анализа, основные кристаллические фазы – авгит, форстерит, энстатит. При нагревании до 1140°С происходит переход энстатита в клиноэнстатит, который при температуре 1200–1250°С распадается на форстерит и кристобалит. Термообработанные при 1200–1250°С пироксениты Аганозера содержат более 80 % авгита. На всех дифрактограммах пробы 308–г хорошо видны дифракционные линии, соответствующие основным межплоскостным расстояниям авгита: 2. 990 Å, 2. 943Å, 2. 523Å, 1. 624Å (область углов 2θ = 29°-35°). Они совпадают с главными линиями диопсида – 3,00; 2,523; 1,616, что свидетельствует о схожести структур авгита и диопсида. Высокое содержание авгита в термообработанных пироксенитах Аганозера предопределяет получение керамики с высоким содержанием авгитовой кристаллической фазы, способствующей получению прочной термостойкой керамики.

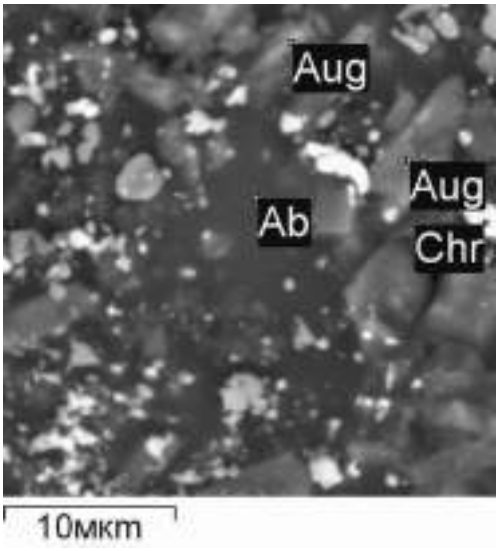
Рентгенофазовый анализ пробы 1508/2 Гайколя показал, что при нагревании до 1100° С входящие в ее состав минералы – хлорит, тремолит, серпентин – разлагаются с образованием новых кристаллических фаз. Из тремолита при 930–980° С удаляется кристаллизационная вода с разрушением структуры амфибола и образованием кристоболита и пироксена (авгита, ряда диопсид-клиноэнстатита) [10]. В пределах 480–800° С наблюдается дегидратация с выделением воды из бруситового и из тетраэдрического слоев и перекристаллизация хлорита [1, 5]. Продуктами перекристаллизации хлорита, очевидно, являются минералы группы энстатита и форстерит. При 980–1000°С происходит перекристаллизация серпентина с образованием форстерита и периклаза. При разложении серпентина образуется аморфный кремнезем, который, взаимодействуя с MgO, увеличивает количество форстерита [1]. При нагревании до 1100° С пироксенитов Сопки Бунтина проба СБ-1, по результатам рентгенофазового анализа, происходит распад тремолита, хлорита и доломита. Карбонаты (кальцит, доломит, магнезит, брейнерит) диссоциируют в интервале температур 600–800° С с потерей CO_2. При распаде образуются CaO и MgO. Основными кристаллическими фазами, при нагревании пироксенитов Сопка Бунтина, являются минералы энстатит и форстерит. Образование основной кристаллической фазы форстерита при нагревании проб 1508/2 и СБ-1 предопределяет получение на их основе форстеритовой керамики, обладающей высокой прочностью, влагостойкостью и низким коэффициентом теплопроводности.

Для изучения влияния пироксенитов исследованных проб (пробы 308–г, 1508, СБ-1) на водопоглощение и усадку были подготовлены составы опытных масс, в которых изменяли содержание пироксенитов от 30 до 90 масс. %, остальное – стеклобой и легкоплавкая глина. В керамических массах в качестве плавня применяется бой щелочно-силикатных стекол, которые при температурах 850–900° С образуют расплав, активно реагирующий с кристаллическими составляющими шихты. При этом присутствие в массе стеклобоя не способствует образованию новых кристаллических фаз, а лишь интенсифицирует процесс спекания, снижая температуру образования первичной жидкой фазы [4, 8]. В целях улучшения спекания, кроме стеклобоя в качестве пластичного компонента, нами использована местная легкоплавкая глина Ивинского месторождения. Глина состоит, в основном, из гидрослюд, кварца, полевых шпатов (альбит–олигоклаз, калиевый полевой шпат), второстепенных минералов – хлорита и амфибола. Образцы, опытных керамических масс обжигались в силитовой печи марки КО-14 при 1100° С.

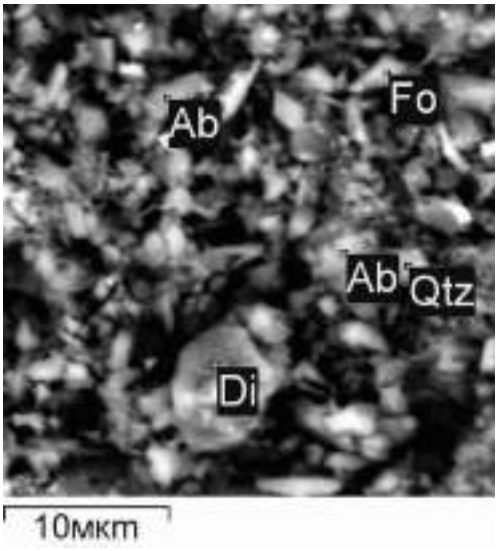
На рисунке 5 представлено электронное изображение микроструктуры керамики на основе пироксенитов, стеклобоя и легкоплавкой глины. Характерной особенностью этих плиток, по данным микроанализа, является неоднородная структура, которая представляет собой тонкозернистую связующую часть керамики с размером зерен <10 мкм и вкрапленных в нее малоизмененных входящих в состав исходного сырья более крупных зерен размером от 10 до 100 мкм.

Крупные зерна в керамике состоят из авгита, диопсида, форстерита, альбита. Встречаются зерна хромшпинелидов. Основная связующая масса, по данным электронной микроскопии, имеет сложный алюмосиликатный состав, включающий, %: 48,74–59,94 SiO_2; 0–0,54 TiO_2; 12,44–14,42 Al_2O_3; 5,99–6,54 $FeO+Fe_2O_3$; 7,98–8,85 CaO; 4,68–12,99 MgO; 4,7–6,29 Na_2O; 1,39–1,58 K_2O. По сравнению с легкоплавкой глиной, тонкодисперсная связующая масса содержит больше MgO и меньше SiO_2 вследствие присут-

ствия продуктов распада магнезиальных силикатов. Методом рентгенофазового анализа установлено, что в керамике, на основе пробы 308–г, кроме авгита (55–65 %), содержится форстерит – 20–21 %, кристобалит – 2–3 %, гематит – 4–5 %, стеклофаза – 7–8,5 % [7].



а

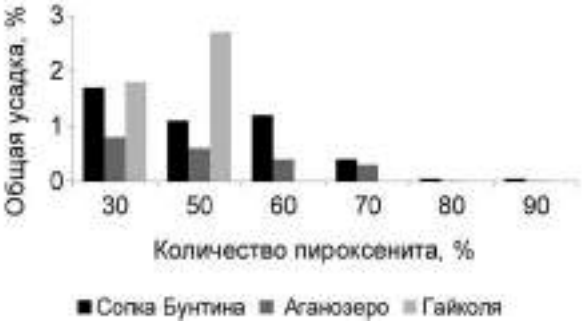


б

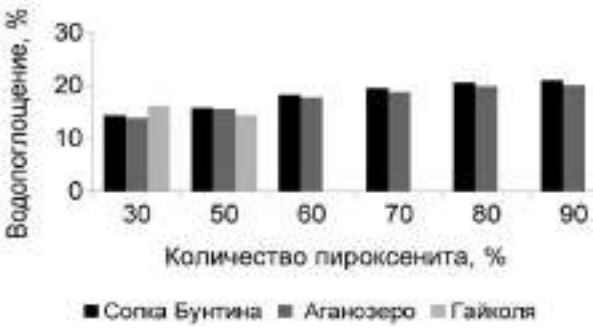
Рис. 5. Электронное изображение микроструктуры керамики на основе пироксенитов: а - 308–г (Aug –авгит, Chr – хромит, Ab – альбит), б – СБ-1 (Di – диопсид, Qtz – кварц, Ab – альбит, Fo – форстерит)

Для всех масс, содержащих от 30 до 90 масс. % пироксенитов, водопоглощение примерно одинаково и составляет при 1100° С от 13 до 15,8 % (рис. 6), что соответствует требованиям для облицовочной плитки. Показатели водопоглощения не превышают требований ГОСТ 6141–91 (не более 16 %) для облицовочной плитки.

При обжиге 1100° С, показатели усадки значительно изменяются в зависимости от содержания пироксенита в шихте.



а



б

Рис. 6. Зависимость показателей общей усадки (а) и водопоглощения (б) от количества пироксенитов в шихте, при обжиге 1100° С

Показатель общей усадки, при одинаковых условиях обжига, более низкий у образцов с пироксенитами Аганозера (<1 %) в составе шихты, по сравнению с образцами на основе пироксенитов Сопка Бунтина (от 1 до 1,8 %) и Гайколя (от 1,9 до 2,7 %) (рис. 6). Причем у образцов, содержащих от 80 до 90 масс. % пироксенитов Аганозеро в шихте, показатель усадки имеет очень низкие, почти нулевые, значения – от 0,4 до 0,2 %. Таким образом, использование пироксенитов в составах керамических масс позволяет получить малоусадочные изделия с хорошими показателями по водопоглощению.

Выводы

Минералогические исследования ультрамафитов представленных трех объектов показали, что они, при высоком содержании оксида магния, состоят из минералов группы пироксена: авгита, диопсида, энстатита. По данным технологических исследований можно предпо-

ложить, что пироксениты Аганозера способствуют образованию авгитовой кристаллической фазы, что свидетельствует о целесообразности использования их в составах малоусадочной керамики, а пироксениты Гайколя и Сопки Бунтина, способствующие образованию форстеритовой фазы, в составах высокопрочной форстеритовой керамики и огнеупоров, обладающих высокой прочностью, влагостойкостью и низким коэффициентом теплопроводности. Керамика, полученная на основе исследованных пироксенитов, обладает хорошими физико-механическими свойствами, удовлетворяет требованиям к изделиям строительной облицовочной керамики. Использование пироксенитов в данном направлении может способствовать решению проблемы их утилизации.

Работа выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН «Научное обоснование потенциала георесурсов нетрадиционных и новых промышленных минералов и горных пород Карелии при их комплексной оценке» (№ госрег. АААА-А16-116020410115-2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Августиник А. И. Керамика Л., Стройиздат, 1975. 590 с.
2. Богачев А. И. Бураковский массив. / Геохимия гипербазитов Карело-Кольского региона. Л., 1971. С. 80–82.
3. Горбик Н. А. Комплекс дифференцированных перидотит-габброноритовых интрузий Гайкольской синклинали. / Интрузивные базиты и гипербазиты Карелии. КарФ АНСССР Институт геологии. Петрозаводск 1984. С. 67–79.
4. Гурьева В. А. Активация процесса спекания алюмомагнезиальных керамических масс. // Вестник ОГУ. 2011. № 5 (124). С. 171–174.
5. Дир У. А., Хауи Р. А., Зусман Дж. Породообразующие минералы. Т. 2 М.: «Мир», 1965, 406 с.
6. Ильина В. П. Керамический теплоизоляционный материал на основе серпентинита. // Стекло и керамика. 2013. № 8. С. 24–27.
7. Ильина В. П., Инина И. С., Фролов П. В. Керамическая масса на основе пироксенита и легкоплавкой глины. // Стекло и керамика, № 10, 2016 г. С. 15–18.
8. Ильина В. П., Лебедева Г. А. Исследование влияния талькового камня и хлорит-тремолитовых пород на фазовый состав и свойства керамической плитки // Стекло и керамика. 2011. № 11. С. 22–25.
9. Лавров М. М., Голубев А. И., Трофимов Н. Н. Геохимия и рудоносность Бураковского расслоенного интрузива. // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 7. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. № 7. С. 75–91.
10. Лазаренко Е. К. Курс минералогии, М, 1971. 607 с.
11. Месторождение «Сопка Бунтина»: http://karier.ru/struktura/dobycha-kamnya/mestorozhdenie-sopka-buntina.
12. Пат. № 2497774 РФ, МПК СО4В 33/132. Сырьевая смесь для изготовления пористого теплоизоляционного материала. / Ильина В. П., Щипцов В. В., Фролов П. В. Патентообладатель Учреждение Российской академии наук Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук. Заявка – № 2012119405/03; заявл. 11.05.2012; опубл. 10.11.13, Бюл. № 31–2.

МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ВЯЖУЩИХ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ТВЕРДЕНИЯ СИСТЕМЫ «ИЗВЕСТЬ – ГРАНИТНОЕ НВ» (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ)

***Жерновский И. В.* [1], *Нелюбова В. В.* [1], *Строкова В. В.* [1], *Осадчий Е. Г.* [2]**

[1]БГТУ им. В. Г. Шухова, г. Белгород; [2]ИЭМ РАН, г. Черноголовка

Применительно к строительному материаловедению, технологическая минералогия представляет собой отрасль знаний, назначение которой заключается в установлении закономерностей преобразований минеральных парагенезисов техногенных неорганических систем функционального назначения в процессах технологических переделов сырья и онтогенического цикла строительных материалов.

Изучение процессов твердения и связанное с этим, изучение минералообразования в автоклавных известково-алюмосиликатных вяжущих на основе магматических пород кислого состава представляется одним из перспективных направлений исследований современного строительного материаловедения. Особенную актуальность это приобретает при использовании алюмосиликатного компонента в виде на-

ноструктурированного вяжущего (НВ), синтезированного по технологии ВКВС (многостадийного мокрого помола) [1–2]. Важнейшей особенностью этих вяжущих является присутствие реакционно-активной алюмосиликатной аморфной (коллоидной) составляющей.

В случае использования в качестве алюмосиликатного сырья для получения НВ горных пород кислого состава – гранитов, предполагается, что характерной особенностью вяжущих автоклавного твердения является суперпозиция механизмов твердения – гидратационного, с образованием гидросиликатов кальция *C-S-H*, и геополимеризационного, с образованием водных алюмосиликатов – цеолитов. Ближайшими аналогами этих вяжущих можно считать известково-зольные вяжущие автоклавного твердения с использованием низкокальциевых электрофильтрованных зол-уноса ТЭС [3–5]. В этих исследованиях, основанных на результатах интерпретации термического анализа автоклавированного известково-зольного камня, утверждается, что фазовый состав новообразований представлен 11Å-алюминий-содержащим тоберморитом, α-C_2SH и *Ca*-алюмосиликатным гелем *C-S-A-H*.

В работе излагаются результаты рентгенографического изучения минерального состава кристаллических новообразований в автоклавированных образцах вяжущей системы «известь – гранитное НВ». Исходным материалом для получения гранитного НВ служил отсевы дробления гранитных пород Полтавского месторождения (Гереевский карьер, Украина). Объектами исследования служили образцы затвердевшего гранитного НВ и автоклавированных в течение 12 часов при 190 °С известково-алюмосиликатных вяжущих составов с весовыми отношениями известь – гранитное НВ – 1:1: 1:1,5: 1:2: 1:2,5 и 1:3.

Задачей рентгенографического изучения автоклавированных образцов вяжущей системы «гранитное НВ – известь» являлось определение минерального состава кристаллических новообразований.

Дифракционные спектры образцов получены на рентгеновской рабочей станции WorkStation ARL 9900 в Центре высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова, с использованием излучения Co-анода. Рентгенометрическая диагностика минеральных кристаллических фаз (качественный РФА) проведена с использованием базы дифракционных данных PDF-2.

Для определения количественных соотношений кристаллических применен полнопрофильный количественный РФА. Расчеты проводились с использованием программы DDM v. 1. 95e, позволяющей при использовании алгоритма «Derivative Difference Minimization» не уточнять аппроксимационные параметры сложноструктурированного фона дифракционного спектра [3]. В качестве структурных моделей минеральных компонентов для полнопрофильного количественного РФА использовались данные ICSD – Inorganic Crystal Structure Database.

Минеральный состав кристаллических фаз гранитного НВ приведен в таблице 1.

Таблица 1

Минеральный состав кристаллических фаз гранитного НВ

Минеральный состав гранитного НВ (вес. %)					
Кварц	Анортит	Биотит	Рог. обманка	Корунд	∑
29,77	49,02	3,06	2,09	15,52	100,00

Кроме обычных, для гранитных пород, минералов в составе гранитного вяжущего обнаружен корунд – продукт намола мелющих тел. Принимая во внимание, что присутствие определенного содержания корунда в составе НВ на основе гранита является неизбежной издержкой технологии его получения и невозможностью его сепарации от вяжущего, в последующих расчетах принималось, что корунд является неотъемлемым компонентом гранитного НВ.

Визуальный анализ рентгенограмм модельных составов экспериментальных автоклавированных образцов позволяет сделать вывод об систематически изменяющемся отличии их минерального состава от исходного гранитного НВ (рис. 1). Продиагностированные минеральные образования в автоклавированных образцах модельных составов можно разбить на четыре группы:

1 – породообразующие минералы гранита (кварц, анортит и биотит);

2 – продукты гидратации и карбонизации извести (портландит, кальцит, арагонит и ватерит);

3 – *C-S-H, C-A-S-H* и *C-A-H*-новообразования (11Å -тоберморит, фошагит, вайракит и катоит);

4 – продукт намола мелющих тел – корунд.

Для проведения полнопрофильного количественного РФА использованы структурные модели: α-кварц – SiO2 (74529–ICSD), анортит – Ca(Al2Si2 O8) (86319–ICSD), биотит – K(Fe2. 554Al0. 446)((Al1. 55 Si2. 45)O10)

(OH)2 (95359–ICSD), портландит – Ca(OH)2 (15471–ICSD), кальцит – CaCO3 (80869–ICSD), арагонит – CaCO3 (32100–ICSD), ватерит – CaCO3 (27827–ICSD), 11Å-тоберморит – Ca4(Si6O15)(OH)2(H2O)5 (87690–ICSD), фошагит – Ca4(Si3O9)(OH)2 (25818–ICSD), вайракит (кальциевый аналог анальцима) – Ca0. 922Na0. 08(Al2Si4O12)□2H2O (98118–ICSD), катоит – Ca3Al2(O4H4)3 (94633–ICSD) и корунд – Al2O3 (9770–ICSD).

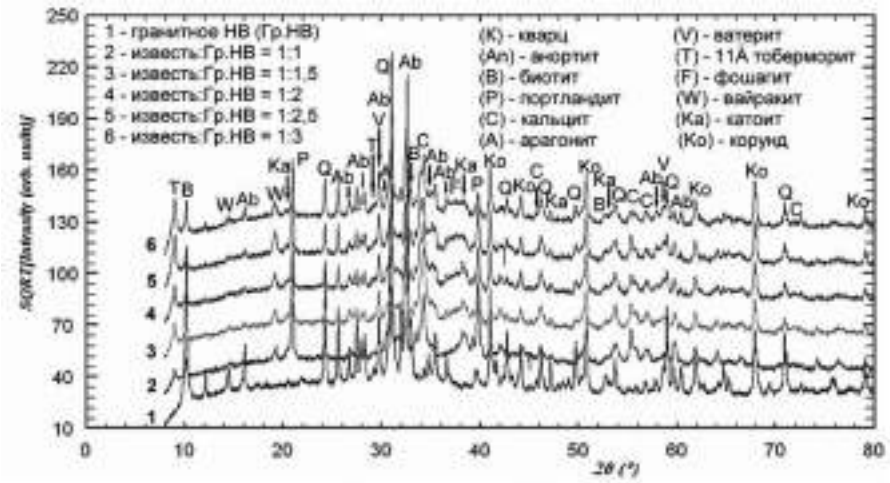


Рис. 1. Сравнительная диаграмма рентгенограмм гранитного НВ и автоклавированных образцов модельных составов. Для визуализации слабых дифракционных отражений, ось ординат проградуирована в значениях

Результаты полнопрофильного количественного РФА автоклавированных модельных составов известного-гранитного вяжущего приведены в таблице 2.

Ввиду существенной сложности изучаемой системы для проведения количественного полнопрофильного РФА, рентгеновские исследования проводились в паллиативном варианте – без определения концентрации аморфной фазы, что, следует отметить, в общем-то, не совсем корректно при исследовании фазообразования в подобных вяжущих системах.

Таблица 2

Минеральный состав автоклавированных известково-гранитных вяжущих (вес. %)

Минеральный компонент		Известь:гранитное НВ (вес. % гранитного НВ)				
		1:1 (50)	1:1. 5 (60)	1:2 (67)	1:2. 5 (71)	1:3 (75)
НВ на основе гранита	Кварц	5,33±0,61	6,26±0,42	8,47±0,51	8,26±0,59	11,05±0,30
	Анортит	9,43±0,51	15,24±0,73	18,92±0,72	21,94±0,83	28,71±1,13
	Биотит	2,32±0,21	2,47±0,24	2,23±0,25	2,34±0,29	2,27±0,18
Известь и продукты ее карбонизации	Портландит	15,42±0,74	9,43±0,84	7,22±0,93	10,70±0,82	7,87±2,83
	Кальцит	13,31±1,08	21,13±1,87	15,01±2,03	11,80±2,52	11,33±1,91
	Арагонит	14,64±1,76	6,90±1,42	6,39±1,10	4,05±0,92	4,91±1,13
	Ватерит	16,04±2,11	13,40±2,46	15,11±2,00	7,51±1,46	6,26±1,21
Ново-образованные фазы	11Å-тоберморит	2,59±0,51	3,88±0,39	4,30±0,41	7,38±0,71	5,65±0,44
	Фошагит	3,04±2,70	2,36±1,72	2,65±1,64	4,77±1,64	3,75±1,50
	Вайракит	2,17±0,38	2,91±0,43	2,85±0,43	4,08±0,85	2,31±0,71
	Катоит	9,59±1,25	7,49±1,02	7,31±0,96	6,99±1,17	5,01±0,99
Намол	Корунд	6,14±0,28	8,54±0,36	9,54±0,29	10,16±0,33	10,88±0,32
∑		100,01	99,99	100	100	99,99

Тем не менее, на основании полученных результатов можно сделать вывод, что взаимодействие силикатных и алюмосиликатных компонентов гранитного НВ с известью приводит к формированию кристаллических фаз систем: $CaO–SiO_2–H_2O$ (11Å-тоберморит и фошагит), $CaO–Al_2O_3–SiO_2–H_2O$ (цеолитовая фаза вайракит) и $CaO–Al_2O_3–H_2O$ (гидрогранат катоит).

Следует отметить, что представленные данные о минеральном составе финального (твердотельного) состояния исследуемой вяжущей системы в явном виде не несут информации об изменениях концентраций кристаллических компонентов, являющихся основными донорами петрогенных элементов[1] для образования минеральных новообразований, формирующих прочностные свойства вяжущей системы. Начальные концентрации кристаллических компонентов гранитного НВ можно получить, исходя их данных в таблице1. В ней приведены значения концентраций минеральных компонентов 100 % гранитного НВ. При разбавлении его известью, концентрации этих компонентов будут изменяться пропорционально содержанию гранитного НВ в модельной системе. На этом основании, можно проиллюстрировать изменение концентраций кварца и анортита в зависимости от содержания НВ в вяжущей системе (рис. 2*а-б*). Уменьшение экспериментально определенной концентрации кварца и анортита в модельных системах относительно расчетных значений может быть интерпретировано как растворение этих компонентов гранитного НВ в щелочной среде извести.

Оценка концентрации извести в вяжущей системе осложнятся тем, что извечтковые компоненты представлены не *CaO*, а портландитом и всеми известными полиморфными модификациями карбоната кальция – кальцитом, арагонитом и ватеритом.

Поэтому в предположении, что известковый компонент модельных вяжущих систем был представлен 100 % *CaO*, что, вообще-то, маловероятно, для оценки баланса извести в системе был произведен пересчет содержания извести в этих минеральных компонентах путем вычитания из их весовых концентраций молярных составляющих – H_2O для портландита и CO_2 для карбонатов кальция по формулам:

$$C_{CaO}^{Ca(OH)_Z} = \frac{CCa(OH)_z \cdot (\nu Ca(OH)_z - \nu H_zO)}{\nu Ca(OH)_z}$$

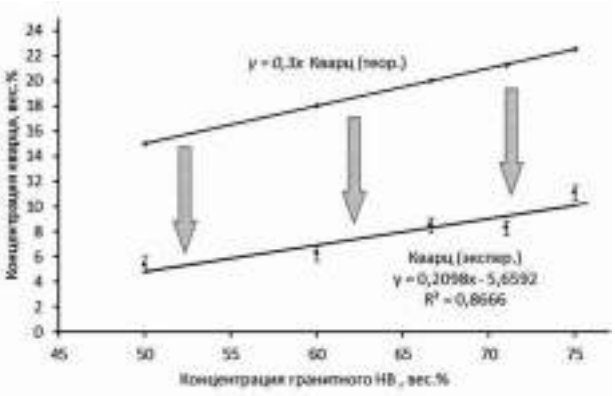
и,

$$C_{CaO}^{CaCO_S} = \frac{CCaCO_s \cdot (\nu CaCO_s - \nu CO_z)}{\nu CaCO_s}$$

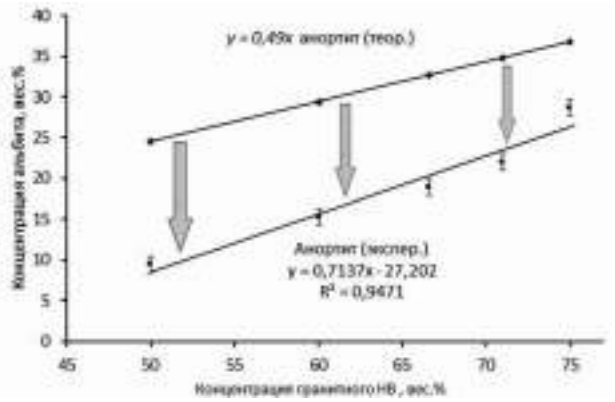
[1] Речь идет об технологическом петрогенезе, т. е. об образовании искусственного каменного материала в процессе автоклавного синтеза.

где и – весовые концентрации *CaO* в портландите и карбонатах кальция, а, и – молекулярные веса обозначенных компонентов.

Результаты расчетов представлены в таблице 3.



а



б

Рис. 2. Тренды изменения концентраций кварца *(а)* и анортита *(б)* в начальном и конечном состоянии вяжущей системы. Экспериментальные данные аппроксимированы линейной функцией.

Таблица 3

Концентрация CaO в автоклавированных известково-гранитных вяжущих (вес. %)

Известь:гранитное НВ (вес. % гранитного НВ)				
1:1 (50)	1:1. 5 (60)	1:2 (67)	1:2. 5 (71)	1:3 (75)
36,32	30,35	25,92	21,19	18,57

На основе приведенных данных, изменение концентрации извести в вяжущей системе можно проиллюстрировать зависимостями на рис. 3.

Таким образом, при твердении в автоклавных условиях модельных вяжущих композиций «известь – гранитное НВ» происходило активное растворение породообразующих кристаллических компонентов – кварца, анортита и извести с образованием *C–S–A–H*-геля. Следует отметить, что определенное количество алюмосиликатного

геля в форме коллоидного раствора образуется в процессе синтеза гранитного НВ. К сожалению, в настоящее время, авторский коллектив не обладает достоверными количественными данными о его концентрационных значениях и составе. Поэтому, располагая только результатами рентгенографического изучения описываемых автоклавированных модельных вяжущих систем, в дальнейшем изложении приведена информация об *C–S–A–H*-геле, образовавшемся в процессе твердения в результате растворения.

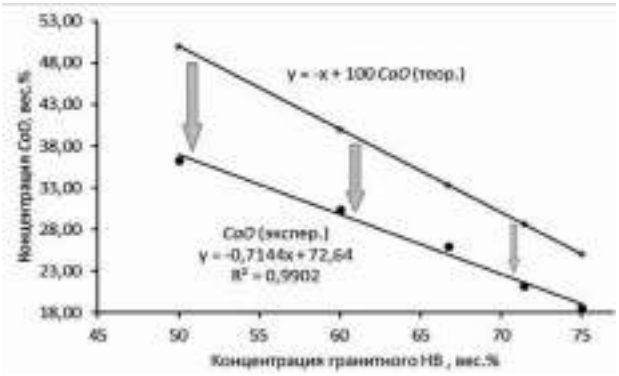


Рис. 3. Тренды изменения концентраций *CaO* в начальном и конечном состоянии вяжущей системы

Реакционную активность кварца и анортита по отношению к извести, в модельных автоклавированных вяжущих, можно представить в виде зависимости на рис. 4.

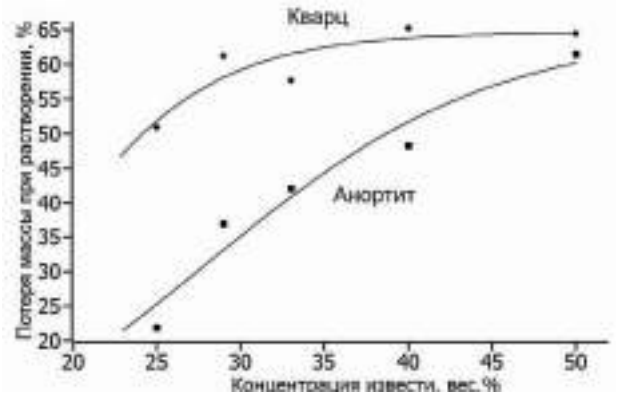
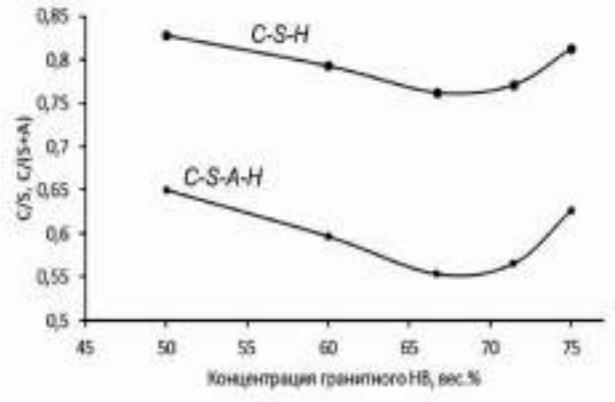


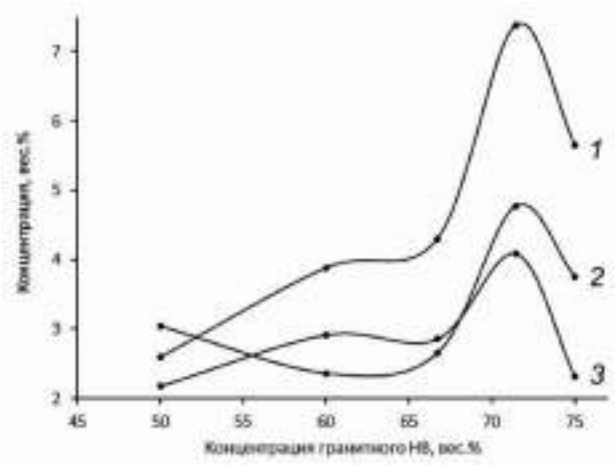
Рис. 4. Реакционная активность кварца и анортита в модельных вяжущих системах

Эти результаты не противоречат здравому смыслу, что в щелочной среде более кислый компонент системы (кварц) растворяется (связывается с известью) более активно, чем компонент боле основный (анортит).

У авторов нет экспериментальных доказательств присутствия в продуктах автоклавного синтеза двух типов гелей – *C-S-H* и *C-S-A-H*, тем не менее, для большей наглядности можно представить зависимости изменения величин *C/S* (для *C-S-H*-геля) и *C/(A+S)* (для *C-S-A-H*-геля) от состава модельных систем (рис. 5*а*). Эти данные получены исходя из концентраций растворенных компонентов – кварца, анортита и извести. С ними коррелируют концентрационные зависимости, от состава вяжущих, основных новообразований – 11Å-тоберморита, фошагита и вайракита (рис. 5*б*). Следует отметить, что ввиду малых интенсивностей *hk0*–отражений 11Å-тоберморита проверка сходимости вычислительного процесса при полнопрофильных расчетах количественного РФА с использованием структурной модели *(Al)*-11Å-тоберморита не проводилась. Поэтому, у авторского коллектива, в настоящее время, нет оснований для отнесения этой фазы к *(Al)*-разновидности. Тем более, что уточненный параметр элементарной ячейки 11Å-тоберморита равен его 22,67Å, что соответствует межплоскостному расстоянию *d*=11,335Å диагностического отражения *(002)*.



а



б

Рис. 5. Зависимости *C/S* и *C/(A+S)* *C-S-H* и *C-S-A-H* гелей *(а)* и концентрации новообразований от состава вяжущих *(б)*. 1 – 11Å-тоберморит, 2 – фошагит, 3 – вайракит

Это же отражение *(Al)*-разновидности 11Å-тоберморита имеет межплоскостное расстояние *d*=11,300Å. Основываясь на этой разнице, авторы работы [5] отнесли 11Å-тоберморит в составе автоклавных известково-зольных материалов к *(Al)*-разновидности.

Отдельно необходимо отметить в числе новообразований гидрограната – катоита. Авторы придерживаются предположения, что этот минеральный компонент образовался не за счет *C-S-A-H*-геля, а благодаря растворению в щелочной среде вяжущего паразитного компонента системы – корунда.

В пользу такой трактовки следует привести однотипность координационного октаэдрического окружения Al^{VI} в корунде и катоите, в отличие от Al^{IV} в *C-S-A-H*-геле и в связанном с ним новообразовании – вайраките. При этом характерно, что прямая концентрации катоита (в допущении линейной зависимости концентрации катоита от содержания известкового компонента вяжущего) повторяет ход расчетной прямой концентрации корунда.

В подтверждение этой интерпретации формирования катоита можно привести факт его «обособленного» положения относительно полей составов *C-S-A-H*-геля и новообразований на его основе на диаграмме составов системы (рис. 7).

Во всяком случае, дискуссировать на эту тему представляется преждевременным, по крайней мере, до получения новых представлений о формировании катоита в исследуемых вяжущих системах.

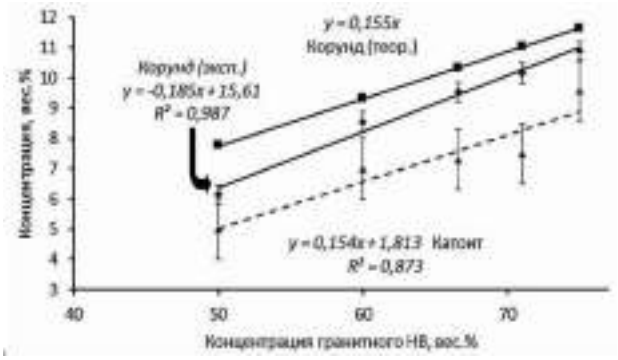


Рис. 6. Концентрационная связь корунда и катоита в вяжущей системе

Завершая изложение результатов исследования, следует заметить, что кристаллизация цеолитной фазы – вайракита свидетельствует о протекании, наряду с гидратационными процессами формирования *C-S-H*-фаз, процессов геополимеризационного типа твердения. Это позволяет рассматривать вяжущую композицию «известь – гранитное НВ» как систему с суперпозицией механизмов твердения.

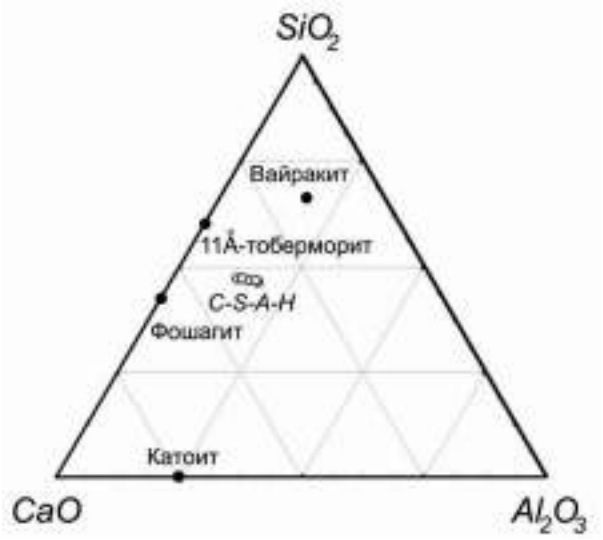


Рис. 7. Поля составов новообразований и *C-S-A-H*-геля в автоклавированных вяжущих системы «известь – гранитное НВ» в проекции на грань CaO-SiO_2–Al_2O_3 тетраэдра составов CaO-SiO_2–Al_2O_3–H_2O

На этом основании можно предложить феноменологическую модель твердения рассматриваемых вяжущих систем (рис. 8).

Рис. 8. Феноменологическое представление минералообразования в системе автоклавного вяжущего «известь – гранитное НВ»

К числу вопросов, выходящих за рамки настоящего исследования и требующего отдельного рассмотрения, необходимо отнести возникновение в затвердевшем вяжущем всех структурных модификаций карбоната кальция – кальцита, арагонита и ватерита. Уверенно отнести их образование к этапу производства извести или автоклавного синтеза, в настоящее время, не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Череватова А. В., Жерновский И. В., Строкова В. В. Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технология и перспективы применения. LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. – Saarbrucken. – 2011. – 170 pp.
2. Жерновский И. В. Алюмосиликатное наноструктурированное вяжущее на основе гранитного сырья. / И. В. Жерновский, М. С. Осадчая, А. В. Череватова, В. В. Строкова. // Строительные материалы. 2014, № 1–2. с. 38–41.
3. Овчаренко Г. И., Михайленко А. А. Взаимосвязь прочности и фазвого состава автоклавного известково-зольного камня. Часть I. // Известия вузов. Строительство. – 2013. № 10. – С. 28–32.
4. Овчаренко Г. И., Михайленко А. А. Взаимосвязь прочности и фазового состава автоклавного известково-зольного камня. Часть II. // Известия вузов. Строительство. – 2014. № 1. – С. 26–32.
5. Овчаренко Г. И., Гильмияров Д. И. Фазовый состав автоклавных известково-зольных материалов. // Известия вузов. Строительство. – 2013. № 9. – С. 28–33.
6. Solovyov L. A. Full-profile refinement by derivative difference minimization // Journal of Applied Crystallography. 2004. 37. P. 743–749.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА И ОБОГАТИМОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПО РЕНТГЕНОТОМОГРАФИЧЕСКИМ ДАННЫМ

***Якушина О. А.* [1,2], *Кожевников Д. А.* [2], *Хозяинов М. С.* [2]**

[1] *ФГБУ«ВИМС», г. Москва;* [2] *ГБОУ ВО «Университет Дубна», г. Дубна,* yak_oa@mail.ru

В последние годы активно расширяется применение метода рентгеновской вычислительной, или компьютерной, томографии (РТ) как лабораторного метода исследования руд и пород. В практике исследований для решения задач технологической минералогии этот метод восстановления внутренней структуры объекта по проекционным данным (цифровым снимкам объекта, сделанным с разных точек) с помощью математических методов и алгоритмов основан на преобразованиях, впервые предложенных австрийским математиком И. Радоном (1917 г.). При использовании микрофокусных рентгеновских трубок обеспечивается высокое пространственное разрешение микротомографии. За рубежом называют томографией высокого разрешения High-resolution X-ray computed tomography.

Очевидна привлекательность метода РТ для исследования геообъектов как неразрушающего метода исследований [2, 4–7]. Важными преимуществами метода РТ являются недеструктивность, отсутствие пробоподготовки, естественное состояние слагающих фаз; возможность построения 3D моделей – образов внутренней сферы исследуемого объекта; разделение минералов с близкими оптическими характеристиками. Наличие таких слабо окристаллизованных «рентгеноаморфных» фаз не является ограничением РТ анализа.

Большинство современных лабораторий при изучении вещественного состава пользуются в основном стандартным набором методов: оптико-минералогический, рентгенографический и фазовый элементный (химический), то практическое применение метода РТ может повысить оперативность и эффективность исследований. Известно, что задача исследования минерального вещества состоит в том, чтобы получить наиболее полные, достоверные данные о морфоструктурных характеристиках, т. е. текстурно-структурных, и фазовом (минеральном) составе, выявить взаимосвязь этих параметров с технологическими свойствами руд, обосновать выбор схемы обогащения. При петрофизическом, минералогическом изучении минерального вещества могут возникать определенные трудности из-за сложности полиминерального состава изучаемых объектов, присутствия в них тонкодисперсных и аморфных агрегатов, неоднородности зерен промышленно ценных минералов, близости физических свойств, например, оптических констант минералов.

Изображения томограмм отображают изменяющиеся значения линейного коэффициента отражения рентгеновских лучей (ЛКО) вещества, визуализируя характер распределения фаз и пустотное пространство в тонком плоском слое исследуемого объекта, по которым устанавливают их размеры, т. е. позволяют получать данные о морфо-

структурных особенностях и пустотном пространстве, по которым можно прогнозировать свойства сырья и его поведение в процессах переработки. Эффективность РТ анализа зависит как от характеристик прибора (источника рентгеновского излучения; вида, материала детектора; пространственного разрешения), так и алгоритмов расчета. Укажем, что более высокое пространственное разрешение обеспечивают приборы с микрофокусной рентгеновской трубкой – микротомографы. В зависимости от модели прибора, пространственное разрешение при размере объекта <10 мм, составляет единицы микрометров.

Применять РТ для исследования горных пород и руд в России было предложено и начато в 1990-х гг. [2]. Для этого была специально сконструирована отечественная аппаратура – микротомограф ВТ-50-1 (ООО «Проминтро»). Исследование минерального вещества для получения технологической информации о природном или техногенном сырье имеет задачей определение морфоструктурных характеристик (в т. ч. количественных), т. е. *фазового* (минерального) состава и *текстурно-структурных* характеристик. Надо было разработать методику РТ исследования геообъектов. Подчеркнем *различие* промышленных (РТ) и медицинских (КТ) рентгеновских томографов и методик томографии. Исследуются принципиально различные по способности ослабления рентгеновских лучей вещества: металлы, сплавы, композиты и биологические ткани. Используются разные диапазоны рабочих энергий, соответственно, и разные эффекты взаимодействия с веществом (200–500 кэВ до МэВ и Комптон-эффект для РТ, от 17 до 100 кэВ при основном 20–25 кэВ и фотоэффект для КТ); разные технические решения геометрии сканирования (РТ вращается исследуемый объект, КТ он неподвижен); Разные режимы (РТ импульсный и КТ непрерывный); дозы облучения и рабочие площади сканирования. Отличаются и задачи исследования -в медицине, КТ живых организмов и биологических тканей, томограммы анатомических структур (органов) анализируются прежде всего на предмет наличия/отсутствия патологии. Биологические ткани (мышцы, кровь, кости), в состоят (до 60 %) из связанной воды и слабо поглощают рентгеновские лучи, тогда как минералы – достаточно сильно. *Справочно:* для энергии 100 кэВ, I=100 мА для крови, мышечной ткани и костной ткани μ, составляет 0,178, 0,180 и 0,48 см$^{-1}$ (μ воздуха=0), лишь μ некоторых минералов близко μ косной ткани: 0,44 кварц, 0,53 кальцит, и значительно выше для рудных минералов ~1,5 – сульфиды (пирит, сфалерит) и оксиды (магнетит), 2,91 железо, 14,9 серебро, 62,6 свинец, 98,6 золото.

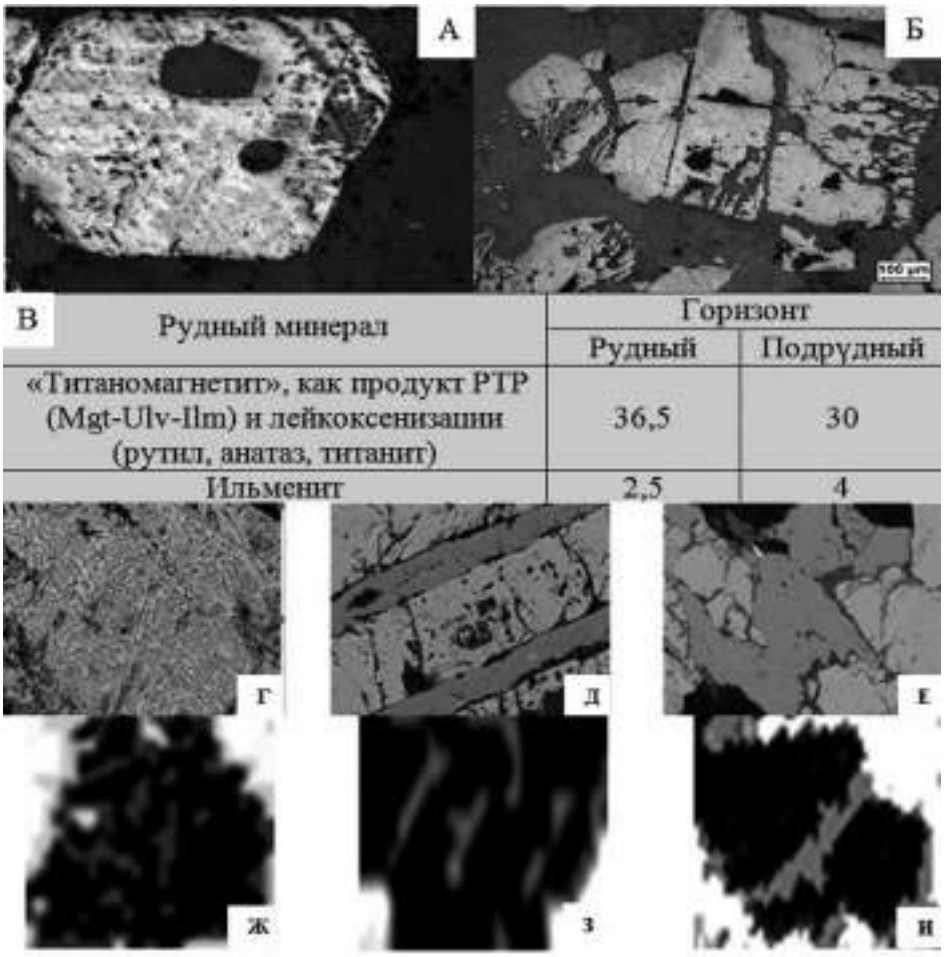
По мнению авторов, можно выделить три основные задачи исследования геовещества, решаемые методом РТ: качественная оценка полноразмерных кернов или кусков, обломков породы, изучение количественных характеристик на уровне микроструктуры и исследования в процессе моделирования различных термобарических условиях. Горные породы и минералы, однако, оказались сложным объектом для исследования РТ, причины этого как в используемом немонохроматическом излучении, так и в сложном строении минеральных объектов: поликомпонентном и изменчивом реальном составе (изоморфизм, полиморфизм, микропримеси), микровключениях других минералов. Тем не менее, в последние годы разные группы за рубежом и в нашей стране ведут разработки по применению метода рентгеновской томографии как лабораторного метода исследования руд и пород в геологии и смежных областях знаний.

Использование РТ позволило решить вопрос о минеральной форме фосфора и особенностях ее микростроения в марганцевых рудах Порожинского месторождения. Методом РТ были исследованы отобранные под бинокулярным микроскопом желваки, имевшие по данным РФА апатит-кварцевый состав и содержавшие рентгеноаморфную фазу. Выяснилось, что апатит совместно с опалом и кварцем образует тонкодисперсные агрегаты, сохраняющие кристаллографическую псевдогексагональную форму, причем внешняя оболочка таких агрегатов толщиной до 100 мкм всегда сформирована опалом, который «маскирует» собственно апатит. Это позволило объяснить невозможность селективного выделения апатита в технологических процессах методами рентгенорадиометрической сепарации и флотации.

В начале лабораторных исследований руд Сейбинского узла по РТ установлен характер взаимоотношения рудообразующих минералов: почти равномерная тонкая вкрапленность кварца и гидроксидов железа в рудном марганцевом агрегате, что показало о невозможность применения физических методов обогащения, характер взаимоотношения марганцевых фаз определил невозможность селективного разделения конкретных

марганцевых минералов, учитывая близость их физических свойств. Визуально зерна рудных минералов всех классов крупности выглядели однородными, но РТ установила, что это пиролюзит-псиломелановыми агрегаты – гидроксиды марганца: на поверхности зерен в результате окисления образуют тонкую оболочку. Эти особенности строения руд влияют на технологических свойствах руды и качество продуктов – перспективно применять химические методы переработки.

При изучении текстурно-структурных особенностей и вещественного состава богатых и бедных титаномагнетитовых руд Пудожгорского месторождения [1] методом Р μРТ показала, что руда сформирована сложными тонковкрапленными агрегатами (размером 30–150 мкм, в среднем ~50 мкм), равномерно распределенными в алюмосиликатной матрице. На томограммах видно, что титаномагнетит является магнетит-ильменитовыми срастаниями с включениями нерудных минералов. В руде присутствует не менее 3–4 рудных и 5–8 породообразующих минеральных фаз, выделяющихся по ЛКО. Томограммы визуализировали, что титаномагнетит – это сложные магнетит-ильменитовые–ульвешпинелевые срастания, т. е. микроагрегат с включениями 3–4 фаз нерудных минералов. Содержание рудных и породообразующих минеральных фаз соответствовало установленному рентгенографическим фазовым анализом. При изучении титаномагнетитовых руд методами μРТ и МРСА установлено, что в оптически относительно однородных образцах, для которых рентгенографичсекий фазовый анализ дает близкие содержания, на микроуровне проявлен неодинаково за счет структур многостадийного распада. Для зерен титаномагнетитов рудного горизонта характерны крупные (до 0,03 мм^2) блоки и пластины ильменита (Ilm) (рис. 1 Д, Е), подрудного – субмикронные ламели («чешуйки») Ilm, равномерно распределенные в объеме зерен титаномагнетита (рис. 1).



Рудный минерал	Горизонт	
	Рудный	Подрудный
«Титаномагнетит», как продукт РТР (Mgt-Ulv-Ilm) и лейкоксенизации (рутил, анатаз, титанит)	36,5	30
Ильменит	2,5	4

Рис. 1. Неоднородность титаномагнетитовых руд Пудожгорского месторождения:
А, Б – ОМ, отраженный свет, николи || (аналитик Пирогов Б. И.);
В – РФА (аналитик Шувалова Ю. Н.). Г, Д, Е – МРСА, ув. 300мкм (аналитик Быстров И. Г.).
Ж, З, И – μРТ (аналитик Якушина О. А.); подрудный горизонт – А, Г, Ж; рудный – Б, Д, Е, З, И

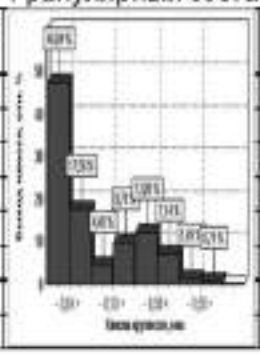
Получена удовлетворительная сходимость данных оптической микроскопии (ОМ) и µРТ о гранулярном составе (рис. 2).: титаномагнетит преобладает в пределах относительно крупных фракций –1,5+0,5 мм (рис. 2), что дает возможность предположить отсутствие его существенных потерь при обогащении в связи с трудноосуществимым и нерентабельным извлечением тонких классов, покрытых нерудной «рубашкой».

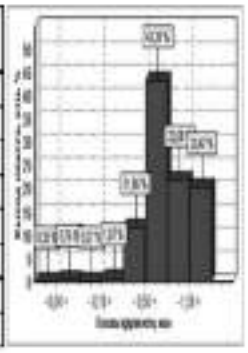
Надрудный горизонт

Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномагнетит	13,01	0,790	0,030	0,189	0,834	1,49

Гранулярный состав

Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %
- 2 + 1,5	0,00	0,00
- 1,5 + 1	2,20	43,68
- 1 + 0,5	7,14	38,78
- 0,5 + 0,2	12,09	14,29
- 0,2 + 0,1	9,71	2,11
- 0,1 + 0,074	4,45	0,32
- 0,074 + 0,044	17,56	0,59
- 0,044 + 0	46,84	0,22



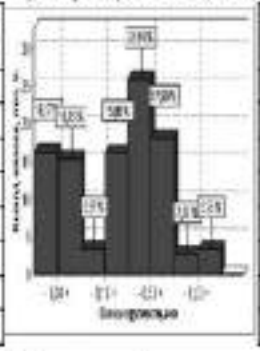


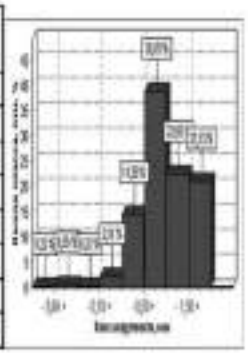
Рудный горизонт

Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномагнетит	28,34	0,72	30	312	2069	1,57

Гранулярный состав

Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %
- 2 + 1,5	0,00	0,00
- 1,5 + 1	5,82	50,46
- 1 + 0,5	17,99	36,58
- 0,5 + 0,2	25,64	11,36
- 0,2 + 0,1	15,86	1,29
- 0,1 + 0,074	3,37	0,09
- 0,074 + 0,044	15,16	0,19
- 0,044 + 0	16,17	0,03



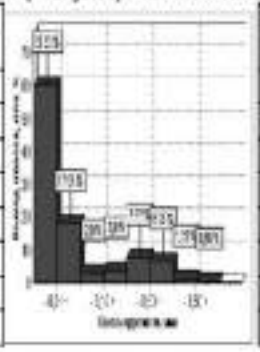


Подрудный горизонт

Минерал	Содержание, %	Изрезанность	Размерность, мкм			Удлинение
			мин.	средн.	макс.	
титаномагнетит	10,25	0,81	20	115	2251	1,49

Гранулярный состав

Кл. крупн., мкм	Количественный Содержание, %	Массовый Содержание, %
- 2 + 1,5	0,00	0,00
- 1,5 + 1	1,70	42,53
- 1 + 0,5	6,29	43,36
- 0,5 + 0,2	7,77	11,66
- 0,2 + 0,1	3,90	1,07
- 0,1 + 0,074	2,90	0,27
- 0,074 + 0,044	17,91	0,76
- 0,044 + 0	59,53	0,35



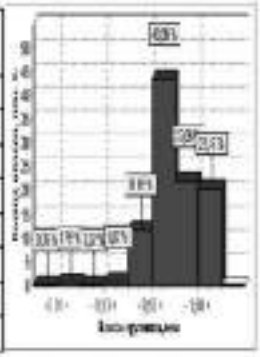


Рис. 2. Расчет морфоструктурных параметров титаномагнетитовых руд по данным µРТ: количественный (А) и массовый (Б) гранулярный состав титаномагнетита (сводные на пробу)

Особое внимание сегодня обращено на техногенное сырье (шлаки, окатыши, хвосты металлургического передела) как потенциальный источник расширения минерально-сырьевой базы страны, а их вовлечение во вторичную переработку сократит техногенную нагрузку на окружающую среду. При прогнозировании качества техногенного минерального сырья (шлаков, окатышей, лежалых хвостов металлургического передела) необходимо учитывать их существенные отличия от природных руд по составу и свойствам. Среди специфических особенностей состава и строения – макроскопическая однородность; гранулярный состав рудных фаз и сложный характер их срастаний как между собой, так и нередко со шлакообразующим материалом, приводящий к образованию ультратонких полиминеральных агрегатов; присутствие значительного количества рентгеноаморфных фаз; широко развитый изоморфизм минералов группы шпинелей, которые достаточно часто являются главными рудными минералами.

С целью определения возможности вторичной переработки были исследованы никельсодержащие шлаки, полученные после электроплавки силикатного никелевого сырья [5]. Ni-шлаки были представлены обломками стекла (95 %) серого, серо-черного и зеленовато-серого цвета, размером 1–2 мм, в которых неравномерно распределены рудные фаз (3 %); иногда в стекле наблюдались зерна кварца, хлорита и талька. По данным химического анализа содержание никеля в пробе 0,16 %, кобальта 0,031 %, железа 16,42 %. РТ-исследование характера распределения основных техногенных фаз проведено на обломках стекла крупностью ~1 мм, строение основной рудной фазы – на агрегатах, выделенных из магнитной фракции. В стекловатой визуально однородной матрице ($\alpha_э/Al_{ос}$~1,57–1,72) установлены сильнопоглощающие фазы ($\alpha_э/Al_{ос}$ 2,71–2,86 и 3,43) в виде округлых выделений размером 110–120 мкм, их количество не превышает 2–3 % (рис. 3–1). Размер внутренней зоны 50 мкм, внешней 20 мкм. С учетом минералогического изучения – это треворит-магнезиоферрит, в различной степени замещенный промежуточными фазами оксидов железа (внешняя зона). Агрегат треворит-магнезиоферритового состава неоднородного строения (рис. 3–2), что свидетельствует о присутствии в нем нескольких фаз, отличающихся содержанием железа. ЛКО основной полезной фазы магнезиоферрита (~3,40) почти в 3 раза выше, чем у стекловатой матрицы (1,57–1,72) и стекла (0,70–0,90); в одном из обломков предположено присутствие металлической фазы (Ni). В магнезиоферрите присутствуют фазы, обладающие большим значением ЛКО, идентифицированные как треворит; отмечаются промежуточные фазы оксидов железа, образовавшиеся в результате замещения основной рудной фазы.

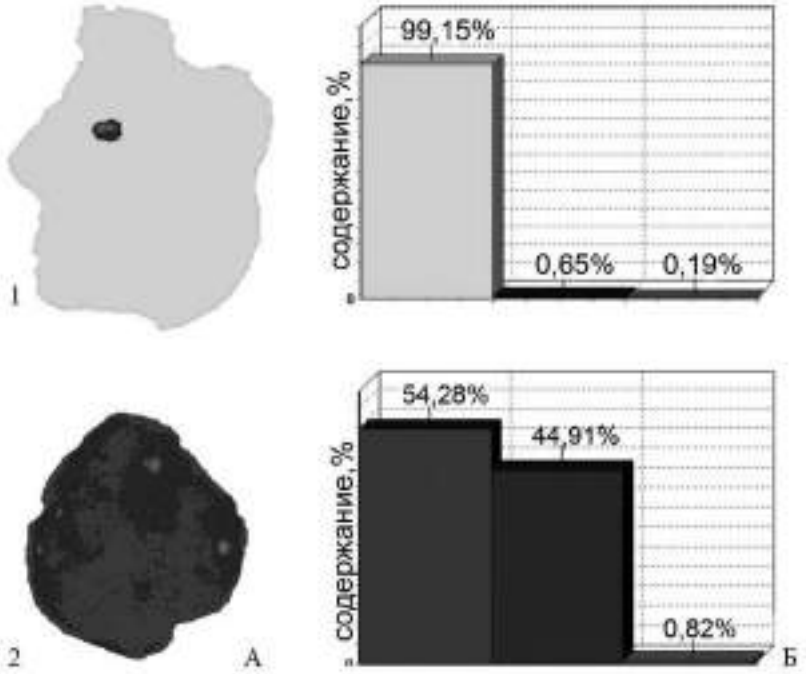


Рис. 3. Ni- шлаки, µРТ: осколок стекла 2,0 мм с двойной фазой треворит-магнезиоферрита в ореоле оксидов железа (1) и агрегат треворита буро-коричневого цвета 1,2 мм (2)

Методом РТ установлены характер распределения и размер рудных техногенных фаз в никельсодержащих шлаках, выявлено гетерогенное строение основной рудной фазы, обусловленное присутствием нескольких железистых фаз в рудных агрегатах треворит-магнезиоферритового состава. РТ на начальном этапе исследований позволил выявить характер распределения основных полезных фаз в шлакообразующей массе.

В настоящее время в ОИЯИ (Дубна) ведутся работы по совершенствованию сенсорной системы (детектора) рентгеновского микротомографа MARS. Данный томограф имеет рабочее поле до 10 см, длина до 28 см (что позволяет исследовать полноразмерный керн) Важно, что исследуемый образец неподвижен, а вращается система источник – детектор. Это позволит проводить моделирование фильтрации флюида через образец в при различных температурах и давлениях. Разрабатываемый детектор на основе арсенида галлия позволит повысить эффективность измерений, а система детектирования в целом позволит также проводить определение энергии регистрируемого кванта.

В целях получения наиболее полной и достоверной информации о минеральном составе, который определяет качество сырья, особенности, характеристики и поведение минеральных фаз в технологические процессах необходимо всестороннее детальное изучение вещественного состава и морфоструктурных параметров природного и техногенного сырья. Важно иметь технологии, которые позволяют оперативно и экономично проводить прогнозную оценку качества сырья. В результате проведенных исследований показано, что изображения томограмм визуализируют (устанавливают) размеры и характер распределения фаз в тонком плоском слое исследуемого объекта, т. е. позволяют получать данные о морфоструктурных особенностях минерального вещества, по которым можно прогнозировать качество, технологические свойства сырья и его поведение в процессах переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быстров И. Г., Пирогов Б. И., Якушина О. А., Хозяинов М. С. Принципы минералого-технологической оценки титаномагнетитовых руд (на примере Пудожгорского месторождения) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 3. – С. 296–299.
2. Хозяинов М. С., Руб А. К., Козорезов Е. В. Использование рентгеновской вычислительной микротомографии в прикладной минералогии // ДАН. 1995, № 4. – С. 516–519.
3. Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Иоспа А. В. Особенности минералогического изучения руд // ГИАБ. – 2014, № 3. – С. 300–303.
4. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Рентгеновская томография – неразрушающий метод структурного и фазового анализа // Мир измерений. 2003, № 10. – С. 12–17.
5. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Томография техногенного минерального сырья // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2015, № 11(251). – С. 39–44.
6. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. Fast metal-bearing ores washability projection on X-ray Computed Tomography data / 1st International Conference on Tomography of Materials and Structures: Book of Abstracts (Ghent, 01–05 July 2013). Ghent, 2013. Part 2. – P. 301–304.
7. Veerle C., Boone M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: a review of the current technology and applications // Earth-Science Reviews / Elsevier, 2013. Vol. 123. – August 2013. – PP. 1–17. – doi: 10. 1016.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕЛЕКТИВНЫХ СВОЙСТВ ОБРАЗЦОВ МУСКОВИТОВЫХ КВАРЦИТОВ (ВОСТОЧНАЯ ХИЗОВААРА) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Чертов А. Н. [1], Горбунова Е. В. [1], Алехин А. А. [1], Скамницкая Л. С. [2], Бубнова Т. П. [2]

[1] Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург; [2] ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Области использования мусковита определяются его промышленным видом и качеством. Листовая слюда традиционно используется в качестве электроизоляционного материала. Измельченная слюда сухого или мокрого помола и скрап (отходы от производства листо-

вой слюды) используются как электротехнический изоляционный материал (например, слюдобумага), наполнитель в производстве различного вида шпаклевок, затирок и красок и др. . В связи с активность рынка декоративных покрытий и косметических средств, сохраняется устойчивый спрос на микронизированный мусковит. По оценкам Геологической службы США в 2015 году мировое производство дробленой слюды и скрапа составило более 1,1 млн т (рис. 1).

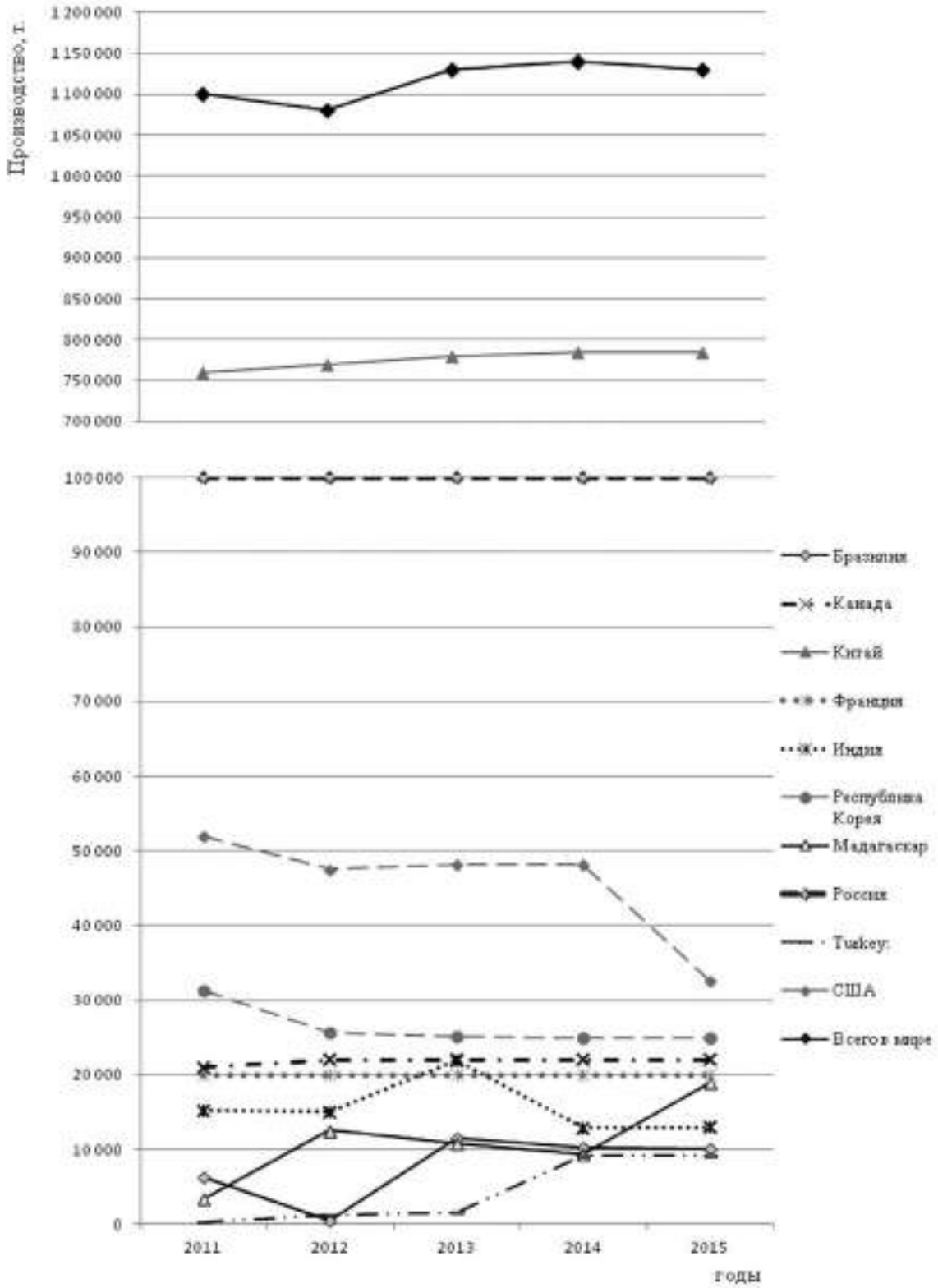


Рис. 1. Мировое производство слюды. Источник:https://minerals. usgs. gov/minerals/pubs/commodity/mica/

Цены на слюду варьирующие в широком диапазоне, для отдельных стран-производителей по состоянию на декабрь 2016 г. приведены в таблице 1.

Таблица 1

Цены на слюду в некоторых странах мира в декабре 2016 г.

Страна-производитель	Продукция	Условия поставки	Цена, $
Индия	скрап	ФОБ Мадрас	350–450
	60 меш, FCL's bagged	ФОБ Дурбан	450–575
	325 меш, FCL's bagged	ФОБ Дурбан	400–475
	мокрого помола	СИФ Европа	550–850
США	микронизированная	франко-завод	700–9500
	мокрого помола	франко-завод	700–12500
	сухого помола	франко-завод	300–400
	чешуйчатая	франко-завод	350–500
Великобритания	сухого помола	с места производства	£ 240–300

Источник: www. indmin. com

На территории Карелии располагается значительное число месторождений и проявлений мусковитовых пегматитов [1]. В Лоухском районе действовали предприятия по шахтной добыче и переработке листового мусковита из слюдяных пегматитов. Но в конце прошлого века, из-за их нерентабельности, шахты законсервированы и все работы приостановлены. Тем не менее, перспективным объектом маложелезистого мелкочешуйчатого мусковита является проявление Восточная Хизоваара (Межозерный). Кварц-мусковитовые кварциты и сланцы выявлены в 1999 году специалистами Северной ПРЭ и Института геологии КарНЦ РАН [2, 3]. Мусковитсодержащие породы проявления представлены белыми и светло-серыми рассланцованными кварц-мусковитовыми метасоматитами с различным содержанием мусковита (от 1–2 до 25 %). Повсеместно в пределах данных пород проявлено окварцевание в виде гнезд, линзочек и прожилков мощностью 0,01–0,5 м, заполненных темно-серым и белым кварцем. Разведочными скважинами устанавливается устойчивое развитие мусковитсодержащих пород до глубины 70–80 м (проектная глубина скважин). Установленная мощность продуктивной толщи составляет около 200 м.

Развитие процессов кислотного выщелачивания кварц-мусковитовой фации проходило по узким зонам рассланцевания, в чего результате наблюдается неравномерность мусковитизации пород и, соответственно, значительные вариации минерального и химического состава пород по скважинам с глубиной – рис. 2, табл. 2. В мусковитсодержащих породах продуктивной толщи проявления содержания породообразующих минералов, по данным минералогического анализа, колеблются в следующих пределах: кварц – 10–71 %; мусковит – 8–42 %; плагиоклаз – 1,5–28 %; кианит – 2–-13,5 %; биотит – 0,1–8 %; рудные (пирит, сфалерит) – 1,5 – 11 %.

В слабомусковитизированных породах слюда представлена мелкими разноориентированными лейстами мусковита (размер 0,1–0,5 мм) в межзерновом пространстве кварц-плагиоклазовой матрицы или внутри зерен кварца (рис. 3-а, б). Мощность таких «пустых» слабо мусковитизированных пород по скважинам колеблется от 0,1–0,5м до 10–30м. С увеличением степени метасоматической переработки породы происходит вынос железа из мусковита и повышение общего содержания слюды до 30–35 % (рис 3-в).

В приконтактовых с амфибол-кианитовыми сланцами зонах интенсивно проявлены процессы фуксиитизации, графитизации, турмалинизации и рудной минерализации. Графит находится в тонких срастаниях с мусковитом (рис. 4) или как микропримесь в зернах кварца.

Практический интерес представляют кварц-мусковитовые сланцы с содержанием мусковита от 18 до 30 %, составляющие до 70 % от общей массы породы. В связи с тем, что мусковит проявления Восточная Хизоваара характеризуется низким содержанием примеси железа [2], он является максимально благоприятным видом сырья для производства перламутровых пигментов. Кроме того, на данном объекте практический интерес представляют кианит, кварц, плагиоклаз, потенциально повышающие экономическую значимость месторождения. По результатам поисково-оценочных работ (2000–2001 гг), оценены запа-

сы мусковита по категории C_2, составляющие 840 тыс. т; прогнозные ресурсы по категории P_1 – 1150 тыс. т. Подсчитаны попутно запасы кварца и кианита. Запасы категории C_2 подсчитаны по южной залежи в контуре скважин 1, 2, 3, 5, 6 до глубины 70 м от поверхности. Содержание мусковита по блоку 17,1 %, запасы руды подсчитаны в количестве 4,5 млн тонн. Дополнительно определены прогнозные ресурсы, что в сумме составляет по категории C_2+P_1 4416 тыс. тонн [1].

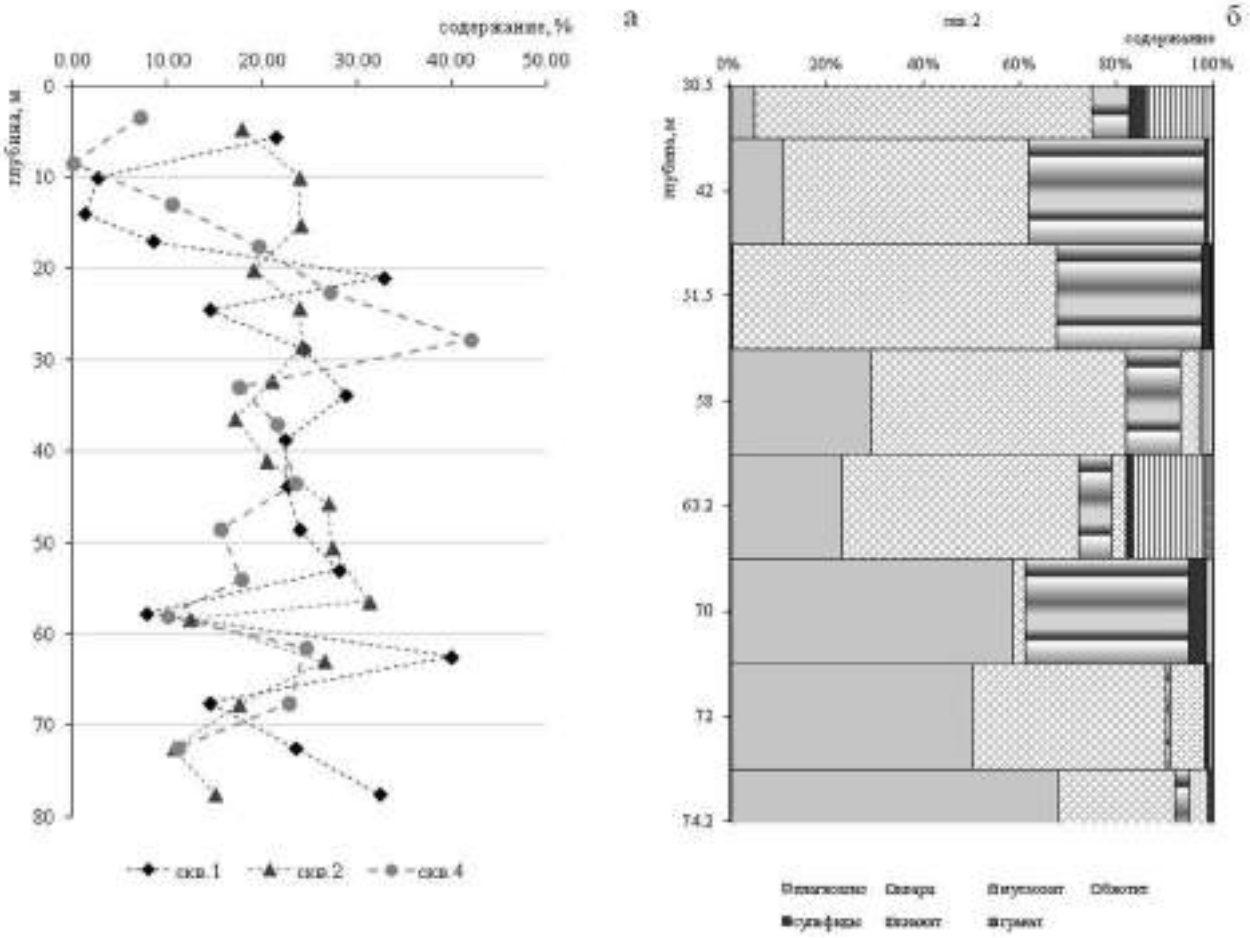
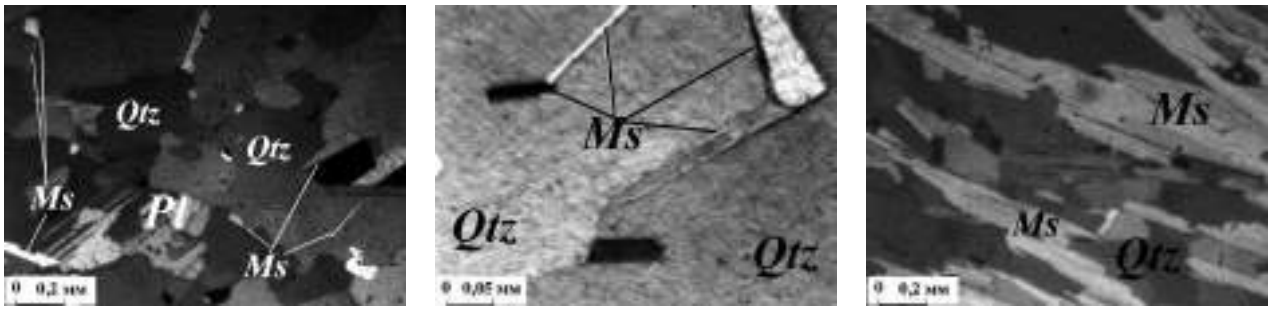


Рис. 2. Содержание мусковита (а) и породообразующих минералов (б) по разрезу I проявления Восточная Хизоваара

Таблица 2

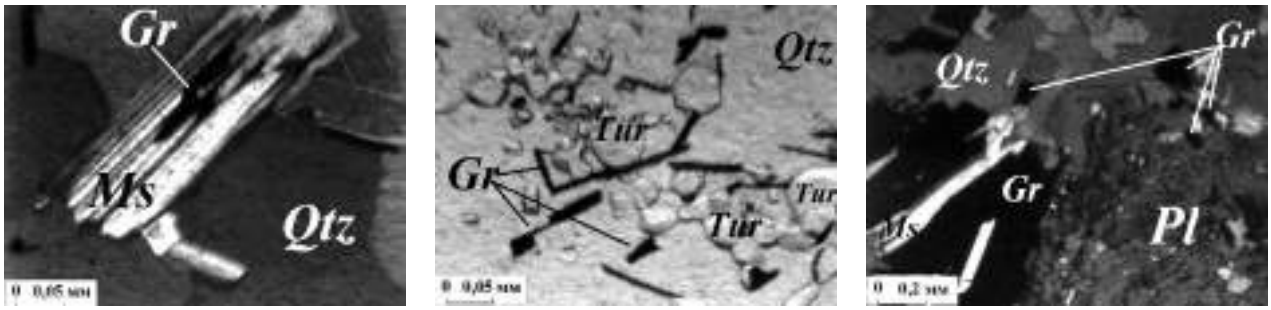
Вариации содержаний породообразующих минералов проявления Восточная Хизоваара по скважинам

№ скв	Кол-во проб	Содержание, отн,%								
		мусковит			кварц			кианит		
		от	до	среднее	от	до	среднее	от	до	средне
1	17	1,0	32,8	22,82	3,77	77,89	55,92	5,0	9,0	6,58
2	17	10,7	32,3	21,17	3,79	81,82	60,50	5,1	13,6	9,20
3	9	1,7	24,2	14,36	5,36	13,20	64,13	3,6	9,8	8,27
4	16	0,1	42,0	17,45	7,35	46,94	70,23	3,6	10,8	4,00
5	13	1,33	25,79	12,81	5,77	60,42	67,88	1,7	12,0	6,7
6	20	4,21	25,48	13,10	3,8	38,71	61,38	1,9	6,9	3,96
7	10	11,57	31,85	22,20			60,00	2,1	7,5	5,3
по участку недр	102	0,1	42,0	17,76	3,77	81,22	64,84	1,7	13,6	6,22



а б в

Рис. 3. Мусковитсодержащие породы проявления Восточная Хизоваара а –кварц-кианитовая порода с содержанием мусковита 2–3 %; б – слабо измененная порода андезитового состава с содержанием мусковита 1–5 %; в – мусковитовые кварциты с содержанием мусковита 20–35 %. Фото шлифов, николи +. Условные обозначения: Qtz – кварц, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит



а б в

Рис. 4. Морфология графита (фото шлифов): а – прорастангие графита в мусковите (николи +); б – включения графита в кварце (николи ||); в – мусковит-графитовый агрегат (николи +).

Условные обозначения: Ms – мусковит, Gr – графит, Tur – турмалин, Pl – плагиоклаз

В промышленности слюда эффективно извлекается гравитационными методами. Обогащение может осуществляться сухим и мокрым способом. Для мокрых процессов используются винтовая сепарация и концентрация на столах. На фабрике Сузор, Квибек (США) руда, содержащая 50 % слюды, обогащается на пневматических столах. Крупность обогащаемой руды –1,6мм. После классифицирования фракции –1,65+0,8 – 0,8+0,4 и –0,4+0,15 мм перерабатываются по отдельности [4].

В России, в качестве обогатительных аппаратов, используются щелевой и гидравлический сепаратор, барабанные грохота, концентрационные столы и флотация [5, 6]. При этом получают концентраты с содержанием мусковита 95–99 %. Извлечение слюды в концентрат зависит от ее содержания в руде и от количества слюды в классе 0,2 мм, который трудно поддается обогащению и по гравитационной технологии обычно выводится в отвал [7].

Текстурно-структурные и минералогические особенности, высокая степень вторичных изменений (тонкие срастания мусковита с графитом, ожелезнение, снижение прочностных характеристик) а также наличие зон окварцевания и приуроченной обильной пиритовой минерализации прожилкового и вкрапленного типа существенно разубоживают мусковитовую руду, вызывают необходимость корректировки технологических схем и режимов обогащения, разработанных ранее [8, 9].

Для повышения эффективности обогащения и вывода в отвальные хвосты на стадии предконцентрации пород с небольшим содержанием мусковита (1–5 %), выполнены экспериментальные исследования селективных свойств образцов мусковитовых кварцитов. Возможности совершенствования процессов рудоподготовки и последующего обогащения появились в связи с развитием технологий оптической сепарации, представляющих уникальную, рациональную и рентабельную альтернативу традиционным обогатительным процессам [10, 11] – гравитации, магнитной сепарации, флотации.

Экспериментальные исследования селективных свойств мусковитовых руд проявления Восточная Хизоваара для изучения возможности их разбраковки по технологическим типам оптическим методом выполнены на материале усред-

ненной пробы, отобранном с поверхности в районе скважин 1 и 4. Изучение проводилось на измельченном материале, фракционированной по крупности: –10+5; -20+10; –40+20 и –60+40 мм.

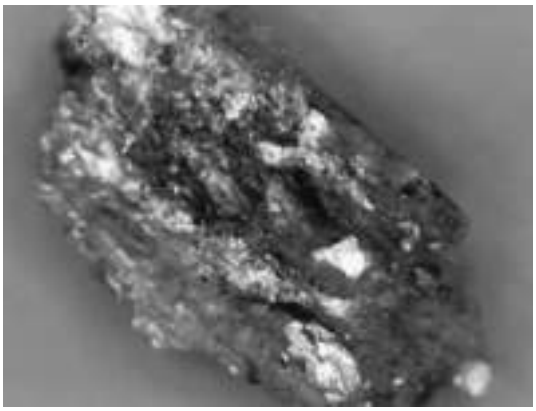
При дроблении руды в щековой дробилке образуются зерна, представленные сростками различных минералов и отличающихся по морфологии (рис. 5):

– объемные зерна почти квадратные с мусковитом и порфиробластами удлиненных кристаллов кианита и плагиоклаза на поверхности – рис. 5-а;

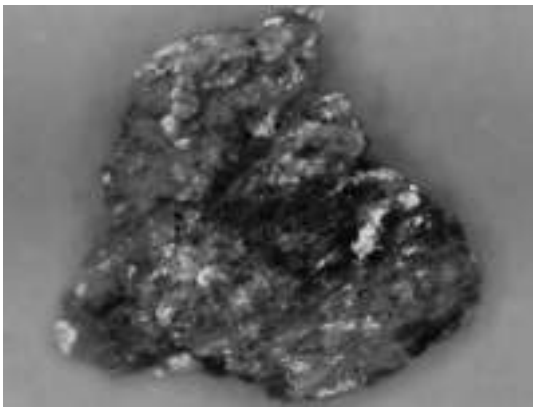
– угловатые зерна с порфиробластами удлиненных кристаллов кианита и плагиоклаза на поверхности, с полным или частичным ожелезнением поверхности – рис. 5-б;

– удлиненные зерна содержащие пойкилобласты кианита и плагиоклаза, с полным или частичным ожелезнением поверхности – рис. 5-в;

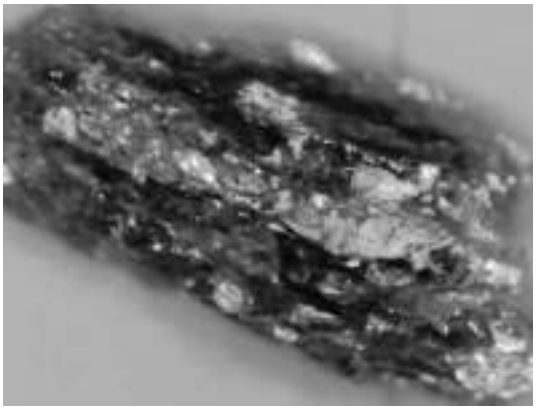
– плоские удлиненные зерна с характерной сланцеватостью, мусковитом на поверхности, множеством черных включений (вероятно графитом) – рис. 5-г.



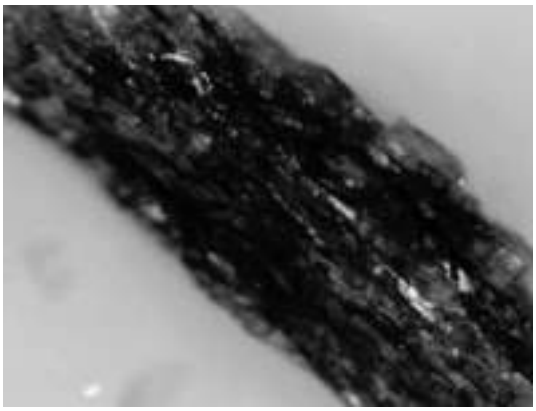
а



б



в



г

Рис. 5. Морфология зерен в дробленном материале (фракция 5–10мм):
а – образец 2, б – образец 3, в – образец 4, г – образец 5

Во всех фракциях измельченного материала сохраняется аналогичный по форме порядок, при этом преобладают плоские удлиненные зерна – 50 %, объемные составляют 31 %, угловатые – 19 % от общей массы навески. Однако корреляции формы зерен и с определенным типом породы не наблюдается., что исключает эффективность использования классификации на предварительной стадии.

Среди механических методов обогащения дробленных пород с непостоянным составом и отличающихся по структурным характеристикам и физико-механическим параметрам важными, с точки зрения их практической эффективности, являются методы, основанные на существенных отличиях в цвете – это фотометрическое и оптическое обогащение, рассчитанное на разделение кускового сырья [11]. В связи с этим проведена классификация зерен фракции 5–10 мм по оптическим свойствам (цвет, блеск) (таблица 3). Количество зерен, покрытых пленками гидрооксидов железа, составляет 41 % от общей массы пробы.

Таблица 3

Классификация зерен фракции 5–10 мм по оптическим свойствам (цвет, блеск).

Группа	Признак	Содержание, вес. %
1	Наиболее чистые зерна, перламутрово-молочно-белые	55,32
2	Зерна перламутрово-молочно-белые с небольшим ржавым оттенком	23,72
3	Зерна с явно выраженным светло-бурым налетом ожелезнения	8,90
4	Аналог группы 2, но зерна серовато-перламутровые, с небольшим ржавым оттенком	8,79
5	Темно-серые, с перламутровым блеском	3,27

В каждой фракции изучено не менее 100 образцов с использованием методов спектрофотометрии и технического зрения. Спектры отражения, полученные от различных областей минеральных объектов каждой крупности исследовались при помощи зонда отражения и обратного рассеяния R200–12–MIXED, спектрофотометра USB4000 и кварцевой лампы накаливания. Также анализировались изображения указанных объектов, снятые при помощи стенда для цветового анализа методом технического зрения.

Исследования позволили установить основные области поиска цветовых оттенков на изображениях минеральных образцов в цветовой системе HLS (рис. 6) – серые, коричневые, светлые желто-оранжевые и фиолетовые – и установить корреляцию между цветовыми параметрами и содержанием мусковита. При этом серые оттенки ассоциировались с кварцем, коричневые и светлые желто-оранжевые предположительно принадлежат мусковиту, а фиолетовые – областям загрязнения.

Зона 1 (ненасыщенные)		Зона 2 (темные оранжевые и желтые)	
H	0 - 360	H	0 - 60
L	0 - 98	L	0 - 40
S	0 - 13	S	14 - 98
Зона 3 (светлые оранж. и желтые)		**Зона 4 (фиолетовые оттенки)**	
H	0 - 60	H	280 - 360
L	41 - 98	L	0 - 98
S	14 - 98	S	14 - 98

Рис. 6. Цветовые зоны, выделенные на изображениях мусковитовых кварцитов месторождения «Восточная Хизоваара», и их границы в цветовой системе HLS

Анализ спектральных характеристик минеральных образцов показал, что в общем и целом, можно выделить три основных графика спектральных распределений коэффициента отражения (1–3 на рисунке 7).

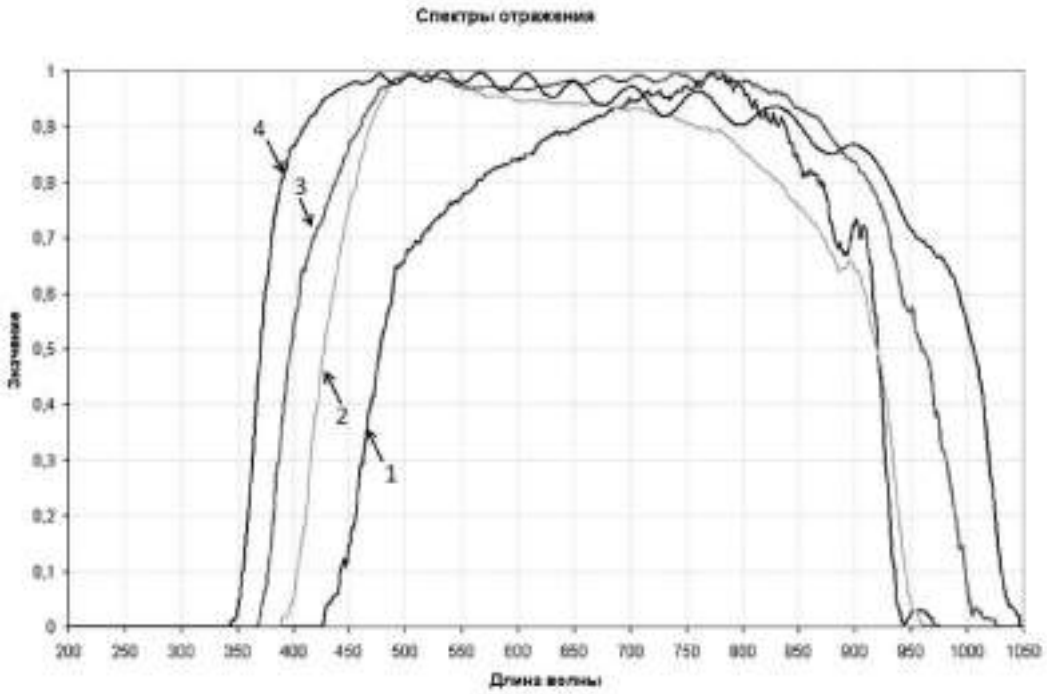


Рис. 7. Основные спектральные характеристики образцов

Графики 1 и 2 имеют по одному ярко выраженному пику: на длине волны примерно 780 нм для графика № 1 и на длине волны примерно 500 нм для графика 2. Также встречаются графики с двумя ярко выраженными пиками отражения – на длинах волн примерно 520 нм и 720 нм – как на графике 3.

Кроме того, на полученных графиках спектральных распределений коэффициента отражения примерно в половине случаев появляется дополнительный узкий пик отражения на длине волны примерно 900нм (слабо выражен на графике 2 и хорошо выражен на графике 1).

В дополнение на основной характер спектра отражения иногда наслаивается некоторая периодическая составляющая (график 4), причем она появляется на разных распределениях.

Исходя из полученных спектров отражения различных областей минеральных областей, для них были рассчитаны координаты цветностей. В соответствии с полученными данными можно утверждать, что основная масса областей объектов имеет желтый и желто-оранжевый оттенки разной насыщенности и светлоты (от очень темных – почти черных – до светлых). Попадаются также области, очень близкие к точке белого – серые оттенки.

Кроме того, присутствуют области зеленого и голубого оттенков на диаграмме МКО (Международная комиссия по освещению), характерные для спектров с пиком отражения на 500 нм, и для спектров с двумя пиками в зеленой и красной областях. В силу особенностей чувствительности цветовых каналов камеры, такие оттенки на изображении отображаются как фиолетовые.

Поэтому теоретически были выделены основные области поиска цветовых оттенков на изображениях: серые (оттенки с маленькой насыщенностью), коричневые (оттенки, имеющие желто-оранжевую цветность и малое значение светлоты), светлые желто-оранжевые и фиолетовые.

После проведения соответствующей коррекции хроматических эффектов используемых оптической системы и матрицы на полученных изображениях объект отделялся от фона. Полученные данные подвергались статистическому анализу. Ввиду того, что классификационный признак разделения исследуемых минеральных объектов не известен, то анализ изображений проводился только в цветовом пространстве HLS.

Полученные данные полностью подтверждают выводы о цветовых признаках объектов, полученные по результатам обработки спектральных распределений коэффициента отражения. Кроме того, по наличию узких пиков при значениях канала цветности, равных 0, 60, 120, 180, 240 и 300 можно утверждать, что имеют место ярко выраженные блики на поверхности минерального объекта, от которых фактически невозможно избавиться (можно попробовать их убрать, применив поляризационный фильтр). Однако количество бликов в проведенном эксперименте, по нашему мнению, не является критичным для реализации качественного анализа полученных изображений.

Поэтому были определены конкретные значения границ выделения вышеописанных зон цветностей (селективные признаки) и рассчитаны области на изображениях объектов, принадлежащие заданным зонам.

Для реализации сортировки объектов методом оптической сепарации, порог разделения может быть определен по одной из выделенных зон цветностей или по их совокупности. Затем, отсортированная руда с одинаковыми минералого-структурными свойствами может эффективно обогащаться гравитационными методами. Оптимальная крупность измельчения соответствует –1 мм. Содержание мусковита в руде технологической пробы составляет 26,5 %. Распределение мусковита по классам крупности неравномерное: в материал крупностью +0,63 мм содержится 13,72 %, что от общего количества составляет 3,6 %. Содержание мусковита в шламовой фракции (-0,1 мм) 45,04 % (28,96 % от общего содержания). Наиболее высокое содержание мусковита наблюдается во фракции –0,25+0,16 мм – 49,7 %. Анализ раскрываемости мусковита (таблица 4) показал, что сростки мусковита с другими минералами присутствуют во всех фракциях крупнее 0,1 мм. Чаще всего это срастания с кварцем, в меньшей степени с кианитом и плагиоклазом. При этом в мелких фракциях вскрывается мусковит мелкий, шестоватой формы.

В процессе комплексного обогащения возможно получение, помимо мусковитового, – кварцевого и кианитового продуктов. Этот факт имеет два положительных момента: непосредственное вовлечения отходов в сферу попутного производства и получение дополнительной товарной продукции из того же объема добываемой горной массы.

Таблица 4

Раскрываемость породообразующих минералов по фракциям при измельчении руды

Фракция мм	Мусковит, %		Кварц	Кианит	Полевые шпаты	Примечание
	общее количество	в том числе в сростках				
+1	28,33	28,33= 100 %	32,55	17,25	21,87	мусковит в не раскрытых сростках с кварцем, кианитом, плагиоклазом
1–0,5	16,60	7,38=44,45 %	55,20	2,37	4,5	сростки мусковита с кварцем -4,69 %; с кианитом -2,64 %; с плагиоклазом –0,05 %
05–0,4	32,59	0,92=2,82 %	58,30	5,60	3,60	сростки мусковита с кварцем – 0,76 %; с кианитом -0,06 %; с плагиоклазом -0,10 %
0,4–0,315	34,60	0,5=1,45 %	54,70	4,90	5,60	сростки мусковита с кварцем
0,315–0,2	44,6	0,2=0,45 %	49	4,40	1,9	сростки слюды с кварцем
0,2–0,16	44,50	0,1=0,22 %	47,40	5,20	2,7	сростки кварца с игольчатой слюдой
0,16–0,1	42,50	0,05=0,12 %	52,70	2,50	2,0	сростки с игольчатой слюдой
0,1–0,63	19,5	нет	61	13,40	2,0	слюда тонкочешуйчатая и тонкоигольчатая
0,063–0,05	25,9	нет	56,00	10,8	2,8	
–0,05*	25,9	нет	56,0	10,8	2,8	

Работа выполнена в рамках темы НИР ПФНИ ГАН «Научное обоснование потенциала георесурсов нетрадиционных и новых промышленных минералов и горных пород Карелии при их комплексной оценке» (№ госрег. АААА-А16-116020410115-2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Минерально-сырьевая база Республики Карелия Кн.-2. Петрозаводск. Карелия 2006. С 81.
2. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Савицкий А. И. Маложелезистые мусковиты Северной Карелии – новый тип чистых промышленных минералов // Роль технологических исследований в решении экологических проблем: (теория, практика, перспективы развития): Материалы к Годичному собранию РМО. М., 2002. С. 192–194.
3. Мусковитовые кварциты Карелии – новый промышленный тип слюдяного сырья / В. В. Щипцов, Л. С. Скамницкая, Т. П. Бубнова, Л. А. Данилевская, В. С. Родионов // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 6. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 67–77.
4. Берт Р. О. Технология гравитационного обогащения. 1990. – 575 с.
5. Келина И. М. Александрова Е. П., Тарчевская И Г, Келина Е. Н. Разработка технологии обогащения мелкочешуйчатых слюдосодержащих сланцев // Технология переработки труднообогатимых руд. М. –1980. – с. 19–33.
6. Байбородин Б. А., Борискин З. М., Малинович Г. И. Обогащение слюдяных руд. 1982. – 245 с.
7. Справочник. Слюда. М. 1997 – 44 с.
8. Изучение вещественного состава мусковитсодержащих кварцитов с использованием современных методов анализа вещества / Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Щипцов В. В. Инина И. С. // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах. Петрозаводск: КарНЦ РАН. – 2012. С. 116–122.
9. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С. Мусковитовые метасоматиты месторождения Восточная Хизоваара как нетрадиционный источник кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 2012. С. 60–65.
10. Мокроусов В. А. Лилеев В. А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М. Недра 1979. С. 127–133.
11. Оптико-электронная система экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом. Алехин А. А., Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Ольховский А. М., Петухова Д. Б., Чертов А. Н. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 11. С. 15–20.

КЛИНКЕР И ШЛАКИ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ УЗБЕКИСТАНА: ТЕХНОЛОГИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Туресебеков А. Х. [1] ***Аллабергенов Р. Д.*** [2]***, Шарипов Х. Т.*** [1]

[1]*Институт геологии и геофизики АН;* [2]*ГП «Центральная лаборатория» Госкомгеологии, г. Ташкент, Узбекистан*

Клинкер цинкового и шлаки медеплавильного предприятий горно-металлургического комплекса Узбекистана являются отходами, которые по содержанию и запасам металлов относятся к разряду крупных техногенных месторождений. Их ценность в том, что они по содержанию ценных компонентов соизмеримы с первичным сырьем. Вместе с тем, они представляют собой проблему из-за «технологической упорности» – они не подвластны существующим технологиям, так как являются продуктом и проблемой этих технологий.

Решение проблемы очевидно при условии: а) глубокого изучения химико-минера-логических характеристик сырья и б) разработки конкурентоспособных технологий переработки на базе знаний форм нахождения ценных компонентов и использования, так называемых, hightech – высоких физхимтехнологий, базирующихся на последних научных достижениях и знаниях технологической минералогии.

В этой связи нами проведены исследования минералого-химических особенностей клинкера цинкового и шлаков медного производств Узбекистана, а также известные альтернативные технологические решения [1–4] для создания ресурсосберегающих и приро-доохранных технологий переработки. Отличительной особенностью рассматриваемых видов техногенного сырья является два взаимодополняющих обстоятельства: с одной стороны, они не требуют затрат на добычу и дробильно-измельчительную подготовку; с другой стороны, из-за упорного характера, они требуют новых прорывных технологий для комплексной переработки. В этой связи известны попытки решить проблему комплексной и эффективной переработки отвалов на базе использования различных пирометаллургических приемов или гидрометаллургических технологий. Недостатки пиро-технологий известны: энергоемкость, пылегазовые выбросы, шлаковые отвалы и др. Современные гидрохимические технологии: автоклавное выщелачивание, окислительное каталитическое вскрытие и др. пока не вышли за рамки поисковых лабораторных исследований. Поиск и разработка технологических решений по комплексной переработке минерального/техногенного сырья с использованием результатов минералогических исследований становятся более целенаправленными и эффективными.

Исследования проводились с применением минералого – технологического картирования и ISP MS – анализов (Perkin Elmer, США), а также детальных микроскопических, рентгенофазовых и микрозондовых (JXA-88R, Япония) исследований и пиро-гидрохимических методов переработки на лабораторном уровне.

Клинкер цинкового производства (табл. 1–3)

Клинер образуется в процессе вельцевания [восстановительного обжига при 1140–1200°C цинковых промпродуктов (кеков, раймовки, шлаков, руды) в присутствии известняка (антиспекатель) и коксика (восстановитель, антиспекатель)]. В результате обжига получают вельц-оксиды (пары цинка, кадмия, свинца, а также химические соединения свинца, индия, германия в виде оксидов или сернокислых солей и др.) и твердый остаток, который называют «клинкер». Вельц-оксиды перерабатывают в цинковом производстве, а клинкер, в основном, отгружают в отвал. Частично клинкер используется в качестве добавки на медеплавильном заводе с целью обеднения медью шлаковых расплавов. Использование клинкера ограничивается небольшими объемами за счет того, что реализуются его восстановительные свойства в качестве реагента для медеплавильного производства, а не как сырье для получения дополнительной продукции. Недостатками предлагаемого решения являются потери железа со шлаками, цинка с пылями и др.

По результатам наших исследований можно констатировать, что*:*

– в клинкере представлен широкий спектр ценных компонентов: определены породообразующие (Si,Mg,Al,K, Na, и др.); рудообразующие (Fe, Cu, Zn, Pb, Mo, As, Sb, S); благородные (Au, Ag, Pt, Pd) и редкометалльные (Se, Re, Hg, Ga, Ge, Bi, Cd) составляющие;

Таблица 1

Пределы колебаний и средний химический состав технологических проб клинкера и шлаков, по данным масс-спектрометрии, в %* и г/т**

№ пп	Состав	Клинкеры	Шлаки	№ пп	Состав	Клинкеры	Шлаки
1*	Na	0,14–0,25	0,59	17**	Co	59–155	–
2*	Al_2O_3	2,32–5,67	4,24	18**	Pt	0,09–2,04	0,13
3*	MgO	0,69–2,09	0,22	19**	Pd	0,58–3,02	0,52
4*	SiO_2	10,6–34,0	24,0	20**	Bi	37–120	–
5*	P_2O_5	0,12–0,20	0,06	21**	W	57–118	–
6*	Sобщ,	5,82–12,10	1,45	22**	Te	70–81	1,29
7*	K_2O	0,55–1,47	1,87	23**	Se	19–290	–
8*	CaO	3,12–7,40	2,04	24**	Ga	59–138	–
9*	TiO_2	0,04–0,21	0,37	25**	Ge	22–55	–
10*	CrO_2	0,05–0,16	–	26**	Mo	37–402	0,079
11*	Fe_2O_3	32,0–58,9	51,62	27**	Sb	380–2170	–
12*	Cu	1,18–4,10	2,02	28**	Hg	63–188	–
13*	Zn	1,35–3,51	–	29**	Ag	381–1030	4,09
14*	As	0,18–0,91	0,0003	30**	Au	2,7–4,0	4,33
15*	Ba	0,76–2,38	–	31**	Re	–	0,018
16*	Pb	0,41–1,74	0,53	32**	Cd	0,0–18	–

– клинкер – это высоко комплексный железо-медь-цинк-свинец-молибден-серебро-золото-редкометалльный промышленный тип месторождения со сложной гетерогенной стекло-фаялит-форстерит-магнетит-гематит-халькопирит-халькозин-пирит-пирротин-брошантитовой минеральной системой, содержащей также сфалерит, галенит, молибденит, борнит, барит, самородные золото, серебро, медь, железо и др.; эта система делает клинкер химически инертным материалом из-за технологически трудной вскрываемости и упорности перечисленных фаз: сульфидов, фаялита, метасиликатов, ферратов и др.;

– в клинкере выявлены минеральные, изоструктурные и входящие в состав минералов изоморфные формы нахождения основных ценных элементов: золота, серебра, меди, железа, никеля, кобальта, цинка, свинца, мышьяка и висмута; так, благородные металлы находятся в основном в силикатных структурах и свободном состоянии; медь на 97 % представлена упорными формами (90 % в виде борнита и халькозина, 7 % халькопирита, 2,4 % феррата меди и 0,6 % металлической меди); железо практически полностью находится в виде химически инертных фаялита, метасиликата и ферратов со шпинелевой структурой; цинк также трудно выщелачиваемый – в виде ферратов со структурой шпинели и силикатов;

– в клинкере присутствуют экзогенные минералы, которые образовались в результате окисления материала (в том числе самовозгоранием): хлориды серебра, свинца, меди, самородная сера, вюртцит, гетит, сидерит, ярозит, англезит, церусит, малахит, азурит и др., окисленность клинкеров достигает 60 %,

– клинкер состоит из минеральных сфероидальных, идиоморфных, каплевидных выделений, размер которых колеблется от 1 до 500 мкм; по размерности он является микро-нано-аморфно-коллоидной системой.

Таблица 2

Минеральный состав клинкера цинкового производства (по данным рентгенофазового и микрозондового анализов)

Класс минералов	Минералы	Содержание, в %
Силикаты и алюмосиликаты	Фаялит, стекло, натрий, медь, калий, магний, свинец, железо	20–25
Оксиды и гидроксиды	Магнетит, гематит, маггемит, гидрогетит, гетит, цинкит, куприт	50–52
Сульфиды	Галенит, пирит, борнит, халькозин, кубанит, арсенопирит, пирротин, сфалерит, аргентит	10–15
Сульфаты, карбонаты Ca, Fe, Pb, Zn, Cu	Малахит, азурит, емитсонит, англузит, биверит, брошантит, церусит и др.	10
Самородные	Fe,Cu,Au,Ag	–

Таблица 3

Химический состав минералов клинкера цинкового производства (по данным микрозондового анализа)

Минерал	Состав, %
Галенит	74,5 Pb; 14. 9 S; 5,0 Zn; 3. 7 Fe; 0,006 Au; 0,24 Ag; 0,8 Cu; 0,08 Te; 0,02 Se; 0,4 Sb; 0,07 Cd; 0,04 As
Борнит	17. 3 Fe; 24,1 S; 0,09 Au; 1,38 Ag; 5,57 Cu; 0,9 Zn; 0,5 Mn;
Арсенопирит	34,9 Fe; 19,8 S
Свинец самородный	96,2 Pb; 1,14 Fe; 2,1 S; 0,06 Cu; 0,07 Se; 0,04 Zn; 2,1 Cl
Серебро самородное	1,2 Fe; 98,2 0,06 Cu; 0,07 Se; 0,04 Zn; 96,2 Pb; 2,1 Cl
Мармитит	48,8 Zn; 15,5 Fe; 34,6 S; 0,3 Cd; 2,9 Mn
Пирротин	60. 2 Fe; 32. 8 S; 5. 3 Cu; 1. 6 As
Кубанит	40. 2 Fe; 36. 0 S; 22. 4 Cu; 1. 4 As
Англезит	68. 0 Pb; 25. 6 S; 5. 07 Ag; 0. 02 Te; 0,04 Se
Церусит	72. 2 Pb; 1. 7 S; 0. 02 Te; 0,02 Se
FePbAgS	25. 1 Ag; 16. 8 Fe; 10. 1 Pb; 6. 8 S; 0. 7 Cu; 0. 37 Zn; 0. 31 Mn; 2. 82 Cl
Брошантит	63. 69 Cu; 0. 32 Fe; 30. 42 S; 1. 07 Zn
Куприт	87. 07 Cu
Фаялит	44. 59 Fe; 1. 45 S; 0,03 Ag; 0. 25 Cu; 1. 72 Zn
Стекло	16. 83 Fe; 0. 57 S; 0,57 Cu; 0. 83 Zn
Магнетит	46. 1 Fe; 0. 26 S; 8. 53 Cu

Шлаки медного производства (табл. 1, 4–5).

Результаты наших исследований показывают, что:

– шлаки относятся к комплексному железо-медь-молибден-золоторудному промышленному типу месторождений со сложной силикатно-оксидно-сульфидно-самородно-сульфатной минеральной геохимической системой.

– в шлаках выявлены минеральные, изоструктурные и входящие в состав минералов изоморфные формы нахождения золота, серебра, меди, железа, никеля, кобальта, цинка, свинца, мышьяка и висмута,

– шлаки подвержены интенсивному окислению; окисленность шлаков достигает 20 %,

– в шлаках определены породообразующие (Si,Mg,Al,K, Na, и др.); рудообразующие (Fe, Cu, Zn, Pb, Mo, As, Sb, S); благородные (Au, Ag, Pt, Pd) и редкометалльные элементы (Se, Re, Hg, Ga, Ge, Bi, Cd).

Технологические работы по комплексной переработке клинкеров цинкового и шлаков медного производства, как минерального сырья подтвердили трудности в достижении эффекта полного разрушения их минеральной матрицы. Вместе с тем, изучение их химико-минералогических особенностей позволило в значительной степени преодолеть указанные трудности благодаря применению нестандартных технологических решений для разрушения упорных связей сырья.

В этой связи, приоритетной технологической операцией, безусловно, является механофизическая активация сырья. Активация заключается в тонком измельчении сырья (до размеров -20 мкм), разрушении твердых пород и дезинтеграции измельченного материала. В результате достигается деформация вещества: сложные частицы сырья разрушаются до простых, сокращаются их линейные размеры, образуются микротрещины в кристаллической матрице породы, разрушаются упорные связи. Микротрещины минералов или химических соединений вещества с разрушением упорных связей между компонентами сырья могут возникать под действием электромагнитного или магнитоимпульсного действия, которые основаны на явлениях электромагнитострикций и являются низко энергетичными методами деструкции. Эти и другие механофизхимические высокие технологии воздействия на упорное сырье благоприятствуют дальнейшей гидрохимической обработке такого материала.

Конкурентоспособным проектом переработки клинкеров и шлаков является технология, предусматривающая цепочку следующих технических операций: «механо-физическая активация сырья»→ «химическая активация сырья»→ «водно-аммиачное выщелачивание цветных металлов»→ «извлечение железа из твердого остатка»→ «автономная переработка свинцового промпродукта с извлечением благородных металлов».

Химическая активация дезинтегрированного сырья включает низкотемпературный сульфатизирующий обжиг с целью перевода цветных металлов в водорастворимую форму. Последующее водно-аммиачное выщелачивание активированного сырья позволяет селективно и максимально пол-

но извлекать цветные металлы с получением сернокислого раствора аммиакатов в основном цинка и меди и твердого остатка, концентрирующего в себе железо, свинец и благородные металлы.

Таблица 4

Минеральный состав шлаков, по данным микроскопии и микрозондирования

Классы	Минерал	Формула	Содержание, в %
Силикаты	Стекло	$(SiAl)_2O_4$	55,0
	Фаялит	$Fe_2[SiO_4]$	
	Форстерит	$Mg[SiO_4]$	
Самородные	Серебро	Ag	Ед. зерна
	Медь	Cu	0,2
Оксиды	Меди	$Cu(Fe,Ni)_2O_4$	0,3
		$(Cu,Co,Ni,Fe_2O_4$	
	Куприт	Cu_2O	
	Fe	FeO	45,0
		Fe_2O_3	
		Fe_3O_4	
	(Ni,Fe,Co)	(Ni,Fe,Co)O	
Сульфиды Cu	Халькозин	Cu_2S	3,7
	Халькопирит	$CuFeS_2$	
	Фаза -1	$Cu_4Fe_5S_8$	
	Фаза -2	$Cu_{12}Fe_4S_{12}$	
	Фаза -4	Cu_4FeS_4	
	Фаза -5	Cu_3FeS_2	
	Фаза -6	$Cu_5Fe_7S_{12}$	
	Фаза -7	$Cu_2Fe_2S_5$	
	Кубанит	$CuFe_2S_3$	
Сульфиды Fe	Пирит	FeS_2	0,2
	Троилит	FeS	
	Fe-сфалерит	$ZnFeS_2$	
Сульфид Pb	Галенит	PbS	
Сульфаты Cu	Фаза	$Cu_3(SO_4)_2(OH)$	1,0
	Брошантит	$CuSO_4.3Cu(OH)_2$	

Таблица 5

Среднее содержание элементов в минералах шлаков медеплавильного предприятия (данные микрозондовых исследований, в %)

Минерал	Состав, %
Стекло	16. 83 Fe; 0. 57 S; 0. 83 Zn
Фаялит	44. 59 Fe; 1. 45 S; 0,03 Ag; 0. 25 Cu; 1. 72 Zn
Серебро самородное	2. 83 Fe; 96. 53 Ag; 0. 19 Cu; 0,38 Ni
Медь самородная	1,09 Fe; 0,77 S; 0,55 Au; 0,29 Ag; 97,3 Cu; 1,07 Ni; 0. 16 Co
Гематит	62,8 Fe; 0,31 Cu
Магнетит	46,1 Fe; 0,26 S; 8,53 Cu; 3,70 Co
Галенит	0,22 Ag; 14. 1 Cu; 10. 41 Fe; 1. 06 Ni; 1. 61 Zn; 73. 87 Pb
Куприт	87. 07 Cu
Пирит	0,28 Ag; 0,72 Cu; 44,88 Fe; 53,98 S
Пирротин	0,06 Ag; 2. 05 Cu; 60. 0 Fe; 45. 14 S; 0. 3 Zn
Троилит	0,38 Ag; 2. 49 Cu; 65,66 Fe; 32,22 S; 0. 08 Zn
Сфалерит	3,11 Cu; 34. 56 S; 38. 89 Zn
Галенит	0,22 Ag; 14. 1 Cu; 10. 41 Fe; 1. 06 Ni; 1. 61Zn; 73. 87 Pb
Сульфиды меди: халько-пирит, борнит, халькозин и др.)	20,0 Fe; 27,16 S; 0,16 Ag; 48,23 Cu; 0,83 Ni; 0. 26 Co; 0,55 Zn
Сульфаты меди(брошантит)	63,69 Cu; 0. 32 Fe; 30. 42 S$ 1. 07 Zn

Извлечение железа из твердого остатка осуществляется путем его сульфатирования низкотемпературным обжигом в смеси с серной кислотой и последующим слабокислым выщелачиванием железа в раствор с получением свинцового промпродукта, обогащенного благородными металлами. Железо из раствора осаждается известным методом гидролиза.

Таким образом, предлагаемая технология позволяет получать кремнеземистый остаток со свободным углеродом (коксиком) и пустой породой, и полуфабрикаты основных компонентов: меди, цинка, железа и свинцового промпродукта, обогащенного благородными металлами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туресебеков А. Х., Уздебаева Л. К. Технология извлечения благородных и цветных металлов из медного клинкера цинкового производства //Мат. V Конгресса оболгатителей стран СНГ. – М.: 2005. С. 24–25.
2. Санакулов К. Научно-технические основы переработки отходов горно-металлургического производства. – Ташкент: Изд-во «Фан» АН РУз, 2009. С. 40.
3. Аллабергенов Р. Д. Лежалый клинкер цинкового производства //Фундаментальная и прикладная гидрометаллургия. –Ташкент: ГП «НИИМР», 2012. С. 30–41.
4. Аллабергенов Р. Д., Ахмедов Р. К., Ходжаев О. Ф. Комплексная переработка отходов цветной металлургии. –Ташкент: Изд-во «Университет», 2013. – 64 с.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И МИКРОПАРАГЕНЕЗИС ВКЛЮЧЕНИЙ В ЦИРКОНЕ КАК ВАЖНЫЙ КРИТЕРИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СЕПАРАЦИИ ЦИРКОНА

Кевлич В. И.

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, kevlich@krc.karelia.ru

Циркон – это удобный минерал для определения возраста его зерен уран-свинцовым методом датирования. В настоящее время выделение циркона из реликтов древнейших пород относится к важной и трудно решаемой задаче. Исследователи сталкиваются с цирконами существенно преобразованными в результате процессов метаморфизма, метасоматоза, тектоники, гипергенеза и др. Различные генетические типы сложны по составу, весьма тонкозернисты, содержат редкие знаки циркона (тысячные, десятитысячные доли процента), что существенно усложняет саму возможность выделения циркона обогатительными методами и разработку схем по выделению концентратов и мономинеральных фракций [2]. Экспериментальные данные по диффузии свинца в кристаллической структуре циркона [15] показывают, что циркон может оставаться в закрытой системе даже в условиях гранулитового метаморфизма при температурах 800 °С и выше.

В этой связи возникает необходимость, применительно к циркону, идентификации методик, разработки схем и технологического прогноза для получения концентратов и мономинеральных фракций циркона. В основе методологии выбора схем, по разделению минералов, [11] лежат геолого-минералогические данные поисково-исследовательского этапа работ, включающие текстурно-структурные особенности, качественно-количественные минералогические характеристики, технологические свойства и генетические особенности минералов.

Геолого-минералого-петрографическое изучение проб различного генезиса и, следовательно, различного минерального состава показывает, что в пределах перспективных рудопроявлений и месторождений в различных точках хотя бы до некоторой степени меняется их минеральный состав, выражающийся в закономерной смене породообразующих и рудных минералов, количественных соотношений между ними, иногда в смене минеральных форм одних и тех же минералов, характере включений, присутствии морфогенетических разновидностей и генераций, в том числе циркона, и появлении в минералах различных элементов примесей [3].

На территории Карелии распространены сложные комплексы эффузивных, интрузивных, осадоч-

ных и метаморфических пород, в которых содержание отмечается в пределах единичных знаков или сотых долей процента, что весьма осложняет выделение циркона. В этой связи для оценки содержания циркона и возможности извлечения его из коренных пород необходимо рассмотреть ряд факторов, оказывающих влияние на разработку технологических схем выделения циркона. К важным факторам относятся текстурно-структурные особенности и минералогический состав породы (таблица), который изменяется в пределах разных типов пород (руд) и конкретных обнажений [7].

Содержание минералов тяжелой фракции пород Карелии в весовых %

Минералы	пегматит	эклогит	кварцито-песчаник	хромитовая руда	мета сомаитит	магнетитов. кварцит	сиенит	гнейс
Амфибол	1,58	11,36	6,9	ед. зн	0,11	6,47	5,59	73,61
Анатаз	0,12			ед. зн				
Апатит	0,08	0,22	1,50	ед. зн	0,79	0,35	2,19	0,41
Биотит	30,7	ед. зн		ед. зн		62,82	3,86	4,60
Брукит			0,90					
Галенит	0,38		ед. зн					
Лейкоксен				ед. зн	0,05			
Гематит			23,00					
Гранат	88,78	48,91	ед. зн		ед. зн	ед. зн	0,73	ед. зн
Грюнерит						0,01		
Дистен					0,02			
Ильменит	0,04	ед. зн				6,25	1,57	0,12
Карбонат			0,20	ед. зн		0,01		
Лимонит					10,00			
Мартит	1,66		ед. зн		0,72			
Монацит	3,38							
Мусковит	0,42							
Оливин				0,86				
Ортит								
Пирит	0,05			ед. зн	ед. зн	17,38	0,09	0,05
Пироксен мон.	0,07	39,19	55,60	23,75		49,45		
Пироксен ромб.				ед. зн				16,67
Пирротин				ед. зн		4,80	ед. зн	0,68
Рутил		0,02		ед. зн				ед. зн
Серпентин				17,6				
Сфен	0,01	ед. зн	0,60	ед. зн	ед. зн		1,10	
Ставролит								
Тальк				ед. зн				
Х-пирит		ед. зн	Ед. зн	ед. зн				0,04
Хлорит						0,30		
Хромит				57,80				
Циркон	0,07	ед. зн	11,30	ед. зн	0,07	0,16	ед. зн	0,04
Эпидот	0,16				87,46	0,02		

Примечание: пегматит-оз. Волоцкое, Приладожье; эклогит – Беломорье, о. Столбиха; кварцит – Хизовара; хромитовая руда – Бураковский массив, Аганозерское месторождение; метасоматит – оз. Монастырское; магнетитовый кварцит – Костомукша; сиенит – Елетьозерский массив; биотит-амфиболовые гнейсы – Елетьозеро.

В горных породах и рудах Карелии, претерпевших неоднократное воздействие процессов метаморфизма, тектоники, метасоматоза, гипергенеза, циркон присутствуют не только в виде идиоморфных и ксеноморфных зерен, но и обломков и разупрочненных зерен (рис. 2). Циркон состоит из однородных простых и сложных, претерпевших обрастание, регенерацию зерен (рис. 1, 3). Они включают несколько разновидностей и генераций циркона, с различным коэффициентом удлинения зерен, присутствием ядер, включениями рудных и нерудных минералов, с вариативностью размеров зерен циркона [5].

Текстурно-структурные особенности – морфология зерен циркона (облик, габитус, коэффициент удлинения), зернистость породы и размер зерен циркона, в том числе микро-включений циркона в основных породообразующих минералах в горных породах и рудах варьируют от целых до сотых и тысячных долей миллиметра. Зерна приурочены к интерстициям, а также в виде включений находятся в породообразующих минералах. Среди морфологических типов циркона наиболее часто встречаются – цирконовый, гиацинтовый, копьевидный, торпедовидный, циртолитовый, а также округлые, эллипсовидные, глыбовидные (рис. 4, 5, 7, 8) и др., простые и сложные кристаллы, и моносростки.

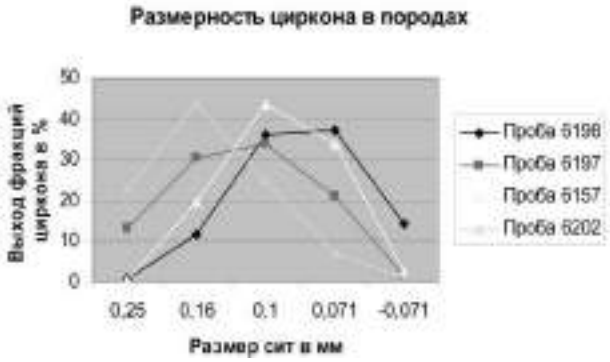


Рис. 1. Размеры зерен циркона в кварцито-песчанниках оз. Верхнее (Хизоваара), г. Воттоваара и оз. Панаярви

Среди кристаллов простого строения (или простые) отмечаются однородные, зональные, прозрачные, с включениями сингенетичных минералов, которые наиболее часто относятся к ранним магматическим кристаллам с унаследованным или не унаследованным расположением зон нарастания, т. е. появляются новые грани, которые фиксируются, либо зарастают и не проявляются в конечной форме циркона. Для сложных характерна общая форма кристалла, состоящая из двух или более индивидов, отвечающая одному из присущих габитусов или обликов циркона. К ним можно отнести наиболее часто встречающиеся регенерационные, обрастания, псевдоморфозы, синтаксические сростки. При этом для регенерационных цирконов отмечается наличие кристалла затравки или ядра со следами воздействия новой минералообразующей среды и появлением скульптур растворения, присыпок, механических повреждений, растрескивания, что свидетельствует о прерывности минералообразования и появления новых генераций [6]. Следует отметить, что зон регенерации может быть несколько, и они могут быть одной или разных генераций. Присутствие породообразующих минералов – амфибола, граната, магнетита, биотита, и др. предусматривает применение в первичных операциях магнитных методов обогащения. Для плагиоклаза, микроклина, мусковита, кварца и др. используются гравитационные методы, а при появлении в составе проб сульфидов или рутила – электрические методы. Существенное влияние на основные технологические свойства, определяющие поведение циркона в аппаратах и процессах разделения, оказывает микропарагенезис включений циркона.

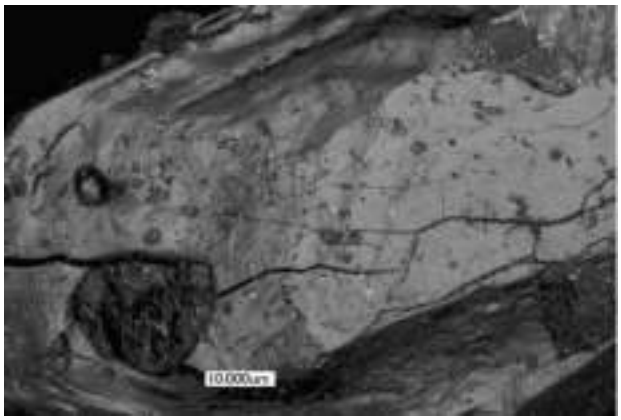


Рис. 2. Включения и микротрещины по зерну циркона

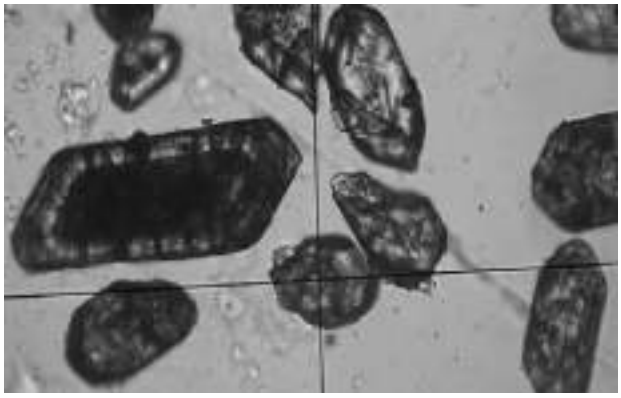


Рис. 3. Циркон из пегматитов

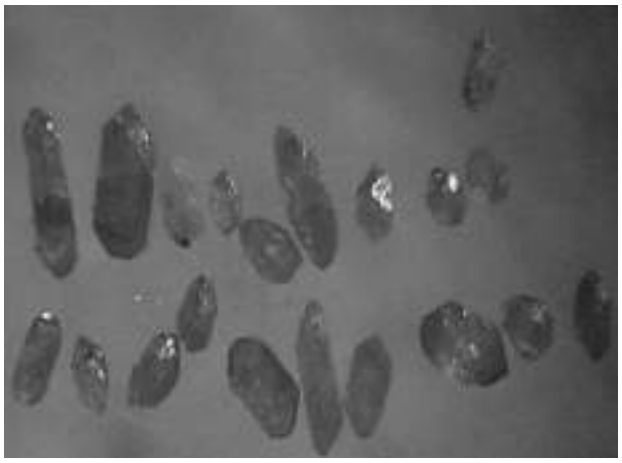


Рис. 4. Циркон из кислых вулканитов

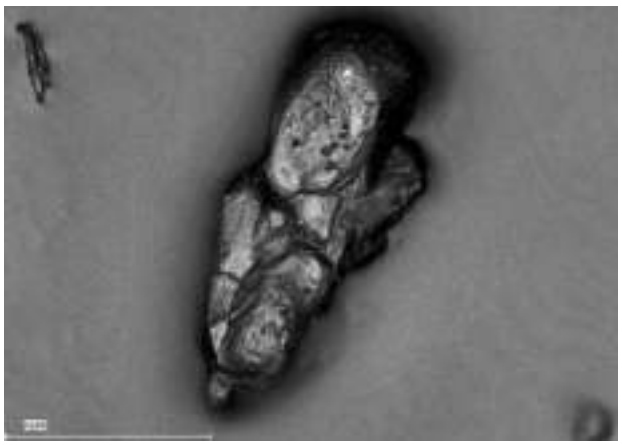


Рис. 5. Моносросток циркона из габбро

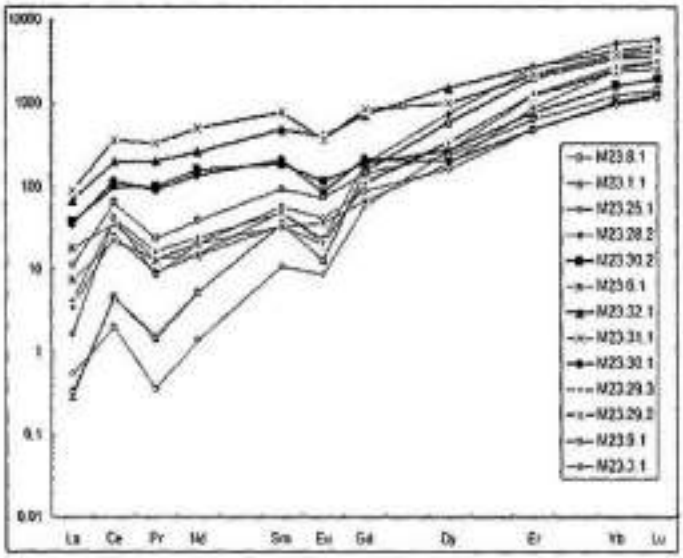
Изучение и анализ состава и структуры цирконов Карелии показывает, что микропарагенезис включений цирконов представлен газовыми, жидкими, твердыми, расплавными включениями. Например, в цирконах Беломорья [9,13] установлены включения сульфидов, ильменитов, гидроокислов, биотитов, амфибола, рутила, апатита и др.

Для Бураковковской и Пудожгорской интрузий характерны включения кварца, хлорита, клинопироксена, калиевого полевого шпата, эпидота, биотита, размер которых от сотых до трех тысячных микрона и менее. [10,11]. По составу цирконы отличаются содержанием Zr/Gf, Ca, Fe, Th, U, Rb, Au и др. элементами, что определяет гетерогенность цирконов обусловленную генезисом. Индикатором изменчивости состава и свойств может служить морфология, окраска, строение и структура зерен цирконов. Минералогическое изучение полученных концентратов и мономинеральных фракций цирконов, позволило выявить особенности морфологии (габитус, облик, коэффициент удлинения), анатомии (строение зерен, зональность, наличие ядер, состояние поверхности ядер, наследование морфологии, зональности и др.), микропарагенезис не только основных зерен циркона, но и их ядер, и, соответственно, наследственность, которые существенно влияют (присыпки, пленки гидроокислов железа на поверхности ядер) на формирование технологических свойств, отражая индивидуальные для пород минералого-генетические особенности и поведение в процессе сепарации.

Теоретический состав циркона, отвечающий формуле ZrSiO4 содержит ZrO2 – 67,22 %, SiO2 – 37,78 %. Однако в природных цирконах всегда содержится довольно широкий набор элементов-примесей: Hf, Y, Ce, Ca, Th, U, Pb, Nb, Ta, Ti, Al, Fe, Mg, Be, Cu, S, Sn, Na, K, Mn, Au и др. (рис. 6). Вместе с тем определения на микрозонде свидетельствуют, что нахождение их в цирконе связано с включениями самостоятельных минералов – апатит, сульфиды, касситерит, магнетит, ильменит, гематит, слюда, полевые шпаты и др. В этой связи к изоморфным в первую очередь следует отнести Hf, Th, Ce, Y, Ca, которые замещают Zr и P, а также Al и OH, замещающие SiO2. Содержание изоморфных примесей в цирконах от следов до десятков процентов Hf и от следов до первых процентов ThO2 и U. По данным изучения монофракций цирконов,из эндербитов и чарнокитов районов озера Ковдозера-Потозера-Керчуг [2,11] устанавливается различие цирконов между собой по содержанию главного элемента, примеси гафния и по соотношению Zr / Hf, что позволяет выделить три типа цирконов: 1– с содержанием Hf =1,35+1,65 %, Zr / Hf=37+42 % – бесцветные, розовые; 2 – содержанием Hf =1,76+2,58, Zr / Hf=22+32 % – бурые-светлобурые; 3 – содержанием Hf=1,1+1,5, Zr / Hf=46+53 %-бесцветные. Наиболее высокие содержания Ca (1,32+1,63 %) и Fe (0,49 + 1,61 %) характерны для интенсивно окрашенных бурых цирконов.

Содержание указанных элементов и их соотношение [4] являются не только важнейшими геохимическими параметрами, но и индикаторами условий образования циркона. Рекристаллизация в интервале 800 – 900 ^{0}C. (1073–1173K) также оказывает влияние на технологические свойства.

К основным факторам, определяющим разработку технологии обогащения и выделения мономинеральных фракций, относятся минералого-технологические свойства циркона. Среди свойств циркона (технологические выделены жирным шрифтом):



Нормированное по хондриту CI распределение REE в не измененных магматических (M.23.8.1, M.23.1.1, M.23.25.1 и M.23.3.1), слабоизмененных (M.23.28.2, M.23.31.1, M.23.6.1, M.23.29.3 и M.23.9.1) и сильноизмененных (M.23.30.2, M.23.32.1, M.23.30.1 и M.23.29.2) зернах циркона из кварцевых аренитов Маякалахтинского ЗКП

Рис. 6. Распределение REE в зернах природных цирконов из кварцевых аренитов

– Цвет	бесцветный,желтый, бледно–желтый, бледно-розовый, красный, бурый
– Степень прозрачности	прозрачный (метамиктный –полупрозрачный до непрозрачного)
– Блеск	алмазный до жирного
– Сингония	тетрагональная
– Спайност	несовершенная
– Морфологические типы	цирконовый, гиацинтовый, копьевидный, торпедовидный, циртолитовый…
– Оптические свойства	одноосный; оптически положительный высокое двупреломление N=1,923–1,960
– Химический состав (теоретический)	ZrO2 -67,22 %, SiO2 -32,78; примеси U, Hf, Th, TR, Ca, Fe, Al…
– Плотность	3,5 – 4,7г/см^3 (включая метамиктный циркон)
– Твердость(шкала Мооса)	7 – 7,5
– Магнитная восприимчивость	120 – 140x10 $^{-6}$ см^3/г
– Электропроводность	10 $^{-13}$ – 10 $^{-11}$ Ом-1 см--1
– Диэлектрическая проницаемость	8,5 – 15; 3,5 – 5,2
– Химические свойства	стоек к действию кислот и щелочей
– Термические эффект	удаление воды в интервале 100–3000 С(373–573К)
– Коэффициент сжимаемости	47,6 x 10–13 см^2 /дин – 48,3 x 10–13 см^2 /дин
– Температурный коэффициент линейного расширения	(20–4000 С)6,9 X 10 $^{-6}$
– Удельная теплоемкость	(25–1000 С) 0291кдж (кг х К)
– Смачиваемость водой	гидрофильны
– Люминесценция в УФ лучах	от бледно до ярко-желтой, оранжевая
– В катодных лучах	зеленый
– Радиоактивность	обладает слабой радиоактивностью
– Сечение захвата тепловых нейтронов	(0,18 0,004) x 10 $^{-28}$ м^2

Технологические свойства, их контрастность зависят не только от состава циркона и внутреннего строения (простое и сложное – обрастание, регенерация, явления эпитаксии и синтаксии и др), но и от состояния поверхности зерен (пленки, примазки, налеты, эродированность), микропарагенезиса включений циркона, что наиболее характерно проявляется (изменчивость свойств) в породах различного генезиса [12].

На изменчивость магнитной восприимчивости циркона в наибольшей степени влияют включения магнетита, пирротина, биотита, гематита, ильменита, пленки гидроокислов железа на поверхности. На электропроводность и диэлектри-

ческую проницаемость включения пирита, пирротина, халькопирита, ильменита, магнетита, и др. проводящих минералов, примазки, пленки, присыпки на поверхности.

Плотность может изменяться от присутствия газовых, жидких, газово-жидких, легких расплавных, рудных, нерудных включений и метамиктных цирконов. Флотационные свойства зависят от налетов, наличия примазок, пленок, граничных состояний поверхностей зерен и др., а открытые включения существенно влияют на электрические и соответственно на поведение и извлечение циркона в процессах сепарации. Наличие разновидностей и генераций циркона с характерной морфологией, строением, структурой (простые и сложные кристаллы), содержанием элементов примесей, комплексом включений и технологических свойств (цвет, показатель преломления, форма, плотность, люминесценция, радиоактивность и др.) предопределяют необходимость включения в технологические схемы выделения циркона дополнительных операций по интенсификации процессов разделения [1]. Среди наиболее часто применяющихся в лабораторной практике способов применяются наложение виброполей, центробежных сил, флотооттирка и ультразвуковая обработка для обновления поверхности, повышения степени расслоения, контрастности гравитационных, магнитных, электрических свойств минералов и зерен циркона в процессе доводочных операций. Изменчивость минералов прямым образом зависит от специфики геологических процессов, что требует детальных геолого-минералогических исследований при разработке технологических схем обогащения и выделения мономинеральных фракций циркона.

С учетом существенного преобразования циркона в полицикличных докембрийских комплексах [8] при разработке схем обогащения и выделения мономинеральных фракций циркона с целью геохронологического изучения следует учитывать специфичность подхода. Высокое требование предъявляется к сохранению генерационного содержания и целостности цирконов, Генетическая значимость информации заключена в кристалле, и даже незначительные содержания циркона в наиболее древних породах могут представлять значительный интерес. Эти условия в соответствии с нашим опытом и работами [5, 8] реализуются в схемах, где дробление, измельчение осуществляется стадиально в открытом цикле с рассевом по разработанным в лаборатории схемам, включающим не только обработку зернистой, но и шламовой части материала проб (частицы менее 50 мкм). В основе выбора методов и разработки схем выделения циркона лежат геолого-минералогические данные поисково-исследовательского этапа работ, включающие, текстурно-структурные особенности, качественно-количественные минералогические характеристики, физические и физико-химические свойства и генетические особенности минералов.

Для извлечения и определения содержания цирконов в породах различного генезиса рекомендуются следующие принципиальные схемы (рис. 9, 10) обогащения проб с весьма низким содержанием циркона.

Из лейкократовых докембрийских пород (граниты рапакиви, плагиограниты, кварцевый порфир, пегматиты, кварциты, диориты, песчаники, и др.) следует использовать схему I (рис. 9.), которая включает следующие основные операции: 1. стадиальное дробление и измельчение до 0,5 – 0,2 мм исходной пробы. 2. обработка измельченного материала на концентрационном столе 30А-КЦ, раздельно классы 0,5 мм + 0,05 мм и 0,05 + 0 мм; 3. магнитная сепарация концентратов стола (концентраты классов 0,5 + 0,05 мм и шламов 0,05 + 0 мм) а индукционно-роликовом магнитном сепараторе 138Т-СЭМ раздельно в слабых и сильных магнитных полях; 4. разделение немагнитных фракций сепарации в тяжелой жидкости (бромоформ); 5. перечистная магнитная сепарация тяжелых фракций разделения в бромоформе в магнитных полях высокой напряженности; 6. магнитогидростатическая сепарация (МГС – сепарация) немагнитных фракций; 7. доводка концентратов циркона с применением электрической сепарации и бинокулярного микроскопа.

Для извлечения цирконов из меланократовых пород (перидотиты, габбронориты, эклогиты, базальты, серпентиниты, амфиболиты и др.) следует использовать схему II (рис. 10.), которая включает следующие основные операции: 1. стадиальное дробление и измельчение до 0,5 мм или до 0,2 мм исходной пробы; 2. классификация в водной среде измельченной породы на классы крупности 0,5 мм или 0,2+0,05 мм и 0,05+0 мм; 3. обесшламливание материала 0,05+0 мм по классу 10–20 мкм; 4. магнитная сепарация на индукционно-роликовом сепараторе 138Т–СЭМ раздельно классов 0,5 или 0,2 мм

+0,05 мм и 0,05 +0,02 мм в слабых и сильных магнитных полях; 5. разделение немагнитных фракций в тяжелой жидкости (бромоформ); 6. перечистная магнитная сепарация тяжелых фракций в магнитных полях высокой напряженности. МГС – сепарация немагнитных фракций; 7. доводка концентратов с использованием электрической сепарации и бинокулярного микроскопа.

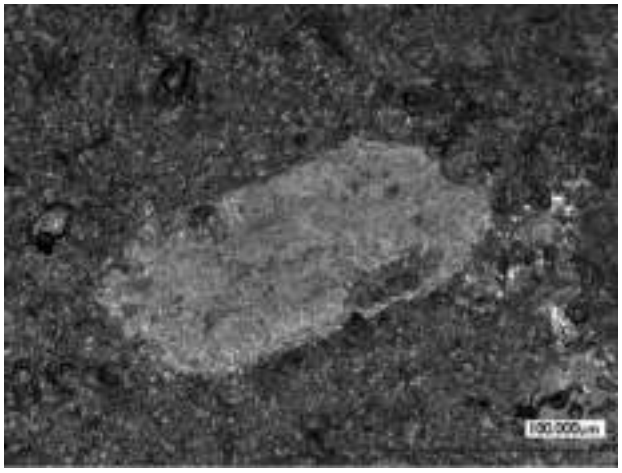


Рис. 7. Циркон в породе (шлиф)

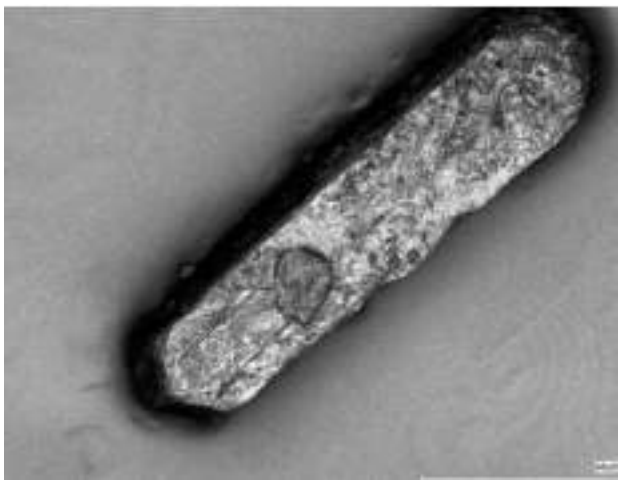


Рис. 8. Циркон из габбро

Рис. 9. Схема I. Выделение циркона из лейкократовых пород

Рис. 10. Схема II. Выделение циркона из меланократовых пород

Выводы

1. В результате исследований показано, что на территории Карелии, где распространены сложные комплексы эффузивных, интрузивных, осадочных и метаморфических пород, а также их классы, ряды, семейства отличающиеся минерально-компонентным составом, текстурно-структурными и минералого-генетическими особенностями, в которых присутствуют разновидности и генерации цирконов, отличающиеся морфологией, анатомией, размером, элементным составом, микропарагенезисом включений и соответственно вариативностью технологических свойств, содержание которых первые проценты или единичные знаки.

2. Схемы выделения циркона для геохронологических исследований свидетельствуют, что ми-

неральный состав и соответственно физические, физико-механические и физико-химические свойства определяют выбор обогатительных методов формирующих технологическую схему выделения циркона и требует применения в схеме методов интенсификации.

3. Установлено, что свойства минералов и поведение в разделительных процессах определяет не только генезис, но и постмагматические процессы микропарагенезис включений циркона (вторичные включения), а также состояния поверхности, (пленки, налеты, примазки и др.) и процессы замещения.

4. При изучении цирконов Беломорья выявлены включения: сульфиды, ильменит, гидроокислы, биотит, амфибол, рутил апатит, и др., для Бураковковской и Пудожгорской интрузий характерны кварц, хлорит, клинопироксен, калиевый полевой шпат, эпидот, биотит, размер таких включений от десятых сотых до трех тысячных микрона и менее.

6. Выделение циркона из лейкократовых и меланократовых горных пород и руд – магнетитовых кварцитов Костомукши, рудных габбродолеритов Пудожгоры и др. свидетельствует не только о необходимости включения в схему корректировки режима в связи с микропарагенезисом (точечные включения магнетита и др. в цирконе), но и методов повышения контрастности свойств.

5. Разработаны технологические схемы I и II выделения циркона из лейкократовых и меланократовых горных пород и руд докембрия Карелии, которые иллюстрируют влияние минерального состава пород и микропарагенезиса минералов на разработку схем выделения циркона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В. А. Теоретические основы повышения контрастности свойств и эффективности разделения минеральных компонентов // Цветные металлы, № 9, 1998 с. 11–17.

2. Кевлич В. И., Кукушкина. П. И., Влияние минерально-компонентного состава пород на технологию выделения циркона. // Сб. научн. ст. по материалам VI Российского семинара по технологической минералогии «Методы оценки технологических свойств минералов и их поведения в технологических процессах» Петрозаводск. 2012. С. 131–138.

3. Володичев О. И., Кевлич. В. И., Левченков. ОА. и др. //ДАН. – М.: 2001. Т. 377. № 2. С. 231–235.

4. Кожевников В. Н., Ивашевская С. Н., Кевлич В. И. Геохимия и романовские спектры цирконов из рудных (PGE – Au) амфиболитов массива Травяная губа, северная Карелия // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. № 7, Петрозаводск 2015. С. 36–52.

5. Кевлич В. И., Володичев О. И., Кукушкина П. И. К вопросу о методике генерационного анализа циркона // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 4. Петрозаводск: КарНЦ РАН,2001г. С. 79–81.

6. Кевлич В. И. О некоторых минералогенетических особенностях циркона, оказывающих влияние на разработку схем обогащения и выделения мономинеральных фракций // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 2. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 89–93.

7. Металлогения Карелии // Отв. ред. С. И. Рыбаков, А. И. Голубев. Петрозаводск, 1999. С. 340.

8. Кевлич В. И. К методике выделения циркона из минерала хозяина для использования в геохронологии. // Геология и полезные ископаемые Карелии. – Петрозаводск: вып. 3, 2001. С. 89–94.

9. Кевлич В. И.,Кукушкина. П. И. Тез. Типоморфные свойства, как основа для выделения и анализа разновидностей и генераций циркона в породах беломорского комплекса. // Мат. межд. научн. конф. «Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения. » – Петрозаводск: 2005.

10. Кевлич В. И., Трофимов Н. Н., Кукушкина П. И. Опыт извлечения цирконов на радиологический возраст из расслоенных и дифференцированных интрузивов // Геодинамика, магматизм седиментогенез и минерагения северо-запада России: Мат. Всеросс. конф. – Петрозаводск: 2007. С. 159–162.

11. Кевлич В. И. Исследование обогатимости руд и горных пород Карелии на основе разработки методов выделения мономинеральных фракций. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. М.,1991. 21 с.

12. Щипцов. В. В. Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов. // Способы прогнозирования технологических свойств индустриальных минералов (на примере минерально- сырьевой базы республики Карелия). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 20–28.

13. Слабунов А. И., Азимов П. Я., Глебовицкий В. А., Жанг Л., Кевлич В. И. // Архейская и палеопротерозойская мигматизация пород, Беломорской провинции Фенноскандинавского щита: петрология, геохронология, геодинамические следствия // ДАН. – М.: 2016. Т. 467. № 1. С. 71–74.

14. Кевлич В. И., Кукушкина П. И, Трифонова А. В. Особенности разрушения кристаллов циркона в процессах дробления и измельчения горных пород. // Сб. научн. ст. по мат. VII Российского семинара по технологической минералогии «Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии» – Петрозаводск: 2013. С. 160–165.

15. Lee J. K. W., Williams I. S., Ellis D. J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon // Nature. 1997. V. 390. P. 159–162.

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ СУЛЬФИДОВ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Красавцева Е. А., Макаров Д. В.

ИППЭС КНЦ РАН, г. Апатиты

Введение

Основу современной минерально-сырьевой базы цветных металлов России составляют тонковкрапленные и труднообогатимые сульфидные руды со сложным вещественным составом. Кроме того, в перспективе в переработку будет вовлекаться нетрадиционное, в частности, техногенное сырье. Вследствие особенностей форм нахождения полезных минералов, их высокой степени дисперсности, изменений физических и физико-химических свойств поверхности такое сырье, как правило, не может эффективно и комплексно перерабатываться с помощью традиционных методов [5].

В этой связи важнейшей научно-практической задачей является повышение контрастности свойств сульфидных минералов для их эффективного разделения на стадии обогащения руды. В настоящее время многими исследователями убедительно показано, что механизм сорбции собирателя (бутилового ксантогената), кинетика флотации сульфидов, особенности взаимодействия минералов в сростках имеют электрохимическую природу [6]. Регулируя состояние поверхности минералов путем различных физических и химических воздействий, можно изменять его электрохимические свойства и, тем самым, управлять процессом флотации сульфидов.

Кроме технологической проблемы существует также экологический аспект. Как известно, сульфидсодержащие хвосты обогащения руд относятся к числу наиболее экологически опасных [2]. При хранении отходов происходит окисление сульфидных минералов, в частности, пирротина с образованием серной кислоты и сульфатов железа и цветных металлов. Процессы химического выветривания техногенных продуктов протекают значительно быстрее, чем в естественной геологической среде. Для понимания природы и механизмов процессов химического выветривания также необходимы исследования физико-химических свойств минералов, в том числе электрохимических.

Использование синтетических минералов заданного состава, во-первых, позволит избежать влияния примесей (мелких вростков других минералов), во-вторых, даст возможность установить влияние состава на их электрохимические, флотационные и сорбционные свойства.

Методика экспериментов

Объектом исследования являлись синтетические пирротины (моноклинный и гексагональный), пентландит и халькопирит. От проведения экспериментов с природными образцами отказались из-за возможного влияния примесей. Синтез минералов осуществляли методом Куллеруда (методом кварцевых ампул) [9]. Данный метод обладает рядом преимуществ: дешевое и простое оборудование; стекло не взаимодействует с серой и сульфидами и, следовательно, может служить материалом для изготовления инертных реакционных сосудов; стекло прозрачно и позволяет визуально изучать шихту в любой момент эксперимента.

В работе использовали карбонильное железо, порошок никеля квалификации ос. ч., порошок меди и элементарную серу квалификации ч. д. а. Рассчитывали необходимое количество элементной серы и железа для составов Fe_9S_{10} (гексагональный пирротин), Fe_7S_8 (моноклинный пирротин), $Fe_{4.5}Ni_{4.5}S_8$ (пентландит) и $CuFeS_2$ (халькопирит). Навески шихты массой 5 или 10 г помещали в кварцевые ампулы. Ампулы вакуумировали.

Затем для получения пирротина запаянные кварцевые ампулы помещали в муфельную печь, нагревали в течение 8 часов до 650ºС и выдерживали при этой температуре 48–96 часов. После этого синтезированный пирротин переплавляли при 1200ºС и охлаждали в печи.

Для синтеза моноклинного пирротина дополнительно вели отжиг при 250 ºС в течение 24 часов.

Ампулы с навесками для получения пентландита нагревали до 1100 ºС и выдерживали 2 часа. Затем проводили изотермический отжиг в течение 48 часов при температуре 600 ºС.

Синтез халькопирита также осуществляли в печи сопротивления. Повышение температуры производили со скоростью 3ºС/мин до температуры на 30–50 ºС превышающей темпера-

туру плавления $CuFeS_2$ (875 ºС), после чего осуществляли изотермическую выдержку в течение 2 ч. По завершении этой процедуры проводили охлаждение до комнатной температуры со скоростью 3–5 ºС/мин. Изотермический отжиг был проведен при 800 ºС К в течение 48 ч.

Состав и мономинеральность образцов контролировали с помощью рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Siemens D5000 (излучение CuK_α) с обработкой сигнала на персональном компьютере.

На рис. 1 в качестве примера представлена рентгенограмма образца синтетического халькопирита. Присутствуют рефлексы, характерные для данного минерала. Стоит отметить, что образцы халькопирита стехиометрического состава не являются однофазными и могут содержать примесь борнита (Cu_5FeS_4) [3]. Поэтому еще одной задачей будет синтез нестехиометрического халькопирита состава $CuFeS_{1.9}$ и борнита и исследование их сорбционных и электрохимических свойств.

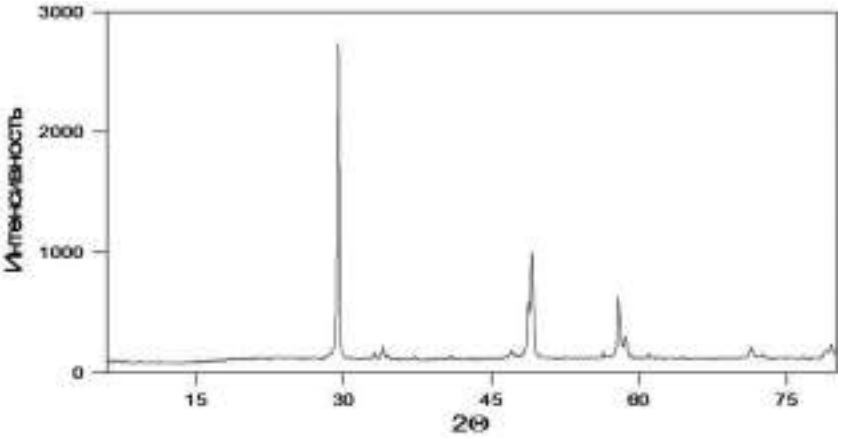


Рис. 1. Рентгенограмма синтетического образца халькопирита состава $CuFeS_2$

В связи с тем, что ксантогенаты неустойчивы в кислых растворах, а также с тем, что флотацию сульфидных руд ведут, как правило, в щелочных средах исследование сорбции бутилового ксантогената калия (БКс) проводили в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе при pH равном 9,18. Навеску 0,1000 г ксантогената растворяли в 100 мл дистиллированной воды. Использовали свежеприготовленный раствор. Затем готовили серию растворов для построения градуировочного графика: 0,02, 0,04, 0,06 и 0,08 мг/мл.

Навеску исследуемого минерала 0,5 г помещали на фильтр Шотта (рис. 2), присоединенный к установке для вакуумного фильтрования, приливали 20 мл дистиллированной воды для промывки образца или избавления от мелкой фракции (обесшламливание), которая проходит через поры фильтра и мешает спектрофотометрическим измерениям, перемешивали несколько минут и отфильтровывали.

Фильтрат отделяли, процедуру повторяли несколько раз. Затем приливали 20 мл воды, в одном эксперименте, и 20 мл буфера с pH=9,18, в другом эксперименте, добавляли 1 мл раствора БКс, перемешивали в течение 5 минут и отфильтровывали. Фильтрат анализировали. Количественное содержание реагента определяли спектрофотометрическим методом (спектрофотометр СФ-2000) в ультрафиолетовой области спектра при длине волны 301 нм [7]. Процедуру повторяли еще раз, затем дополнительно перемешивали 2 раза в течение 15 минут. По полученным данным строили изотерму адсорбции.

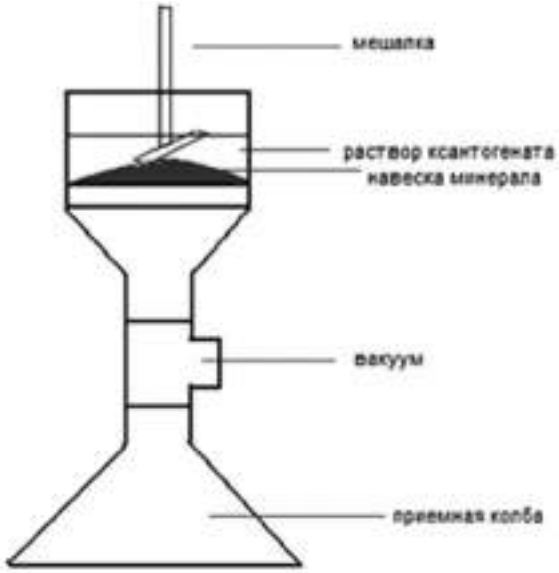


Рис. 2. Установка для исследования сорбции

Для проведения электрохимических измерений применяли стандартную двухэлектродную ячейку. Из синтетических гексагонального пирротина и пентландита изготовили торцевые электроды, поверхность которых перед каждым опытом полировали, промывали спиртом и высушивали. В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод (потенциал относительно водородного электрода +0,204 В). Проводили измерения равновесного потенциала в широком диапазоне pH и при введении в раствор различных количеств БКс.

Измерение потенциала осуществляли в автоматическом режиме с помощью иономера И 160,1 МП, совмещенного с персональным компьютером.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования изменения кинетики сорбции бутилового ксантогената калия в зависимости от кислотности раствора и вида минерала представлены на рис. 3–6.

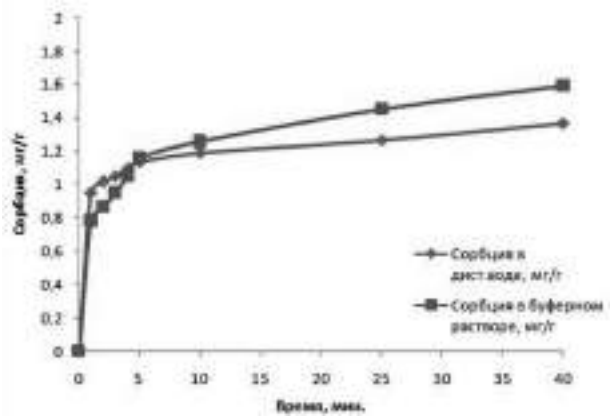


Рис. 3. Кинетика сорбции БКг моноклинным пирротином в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе

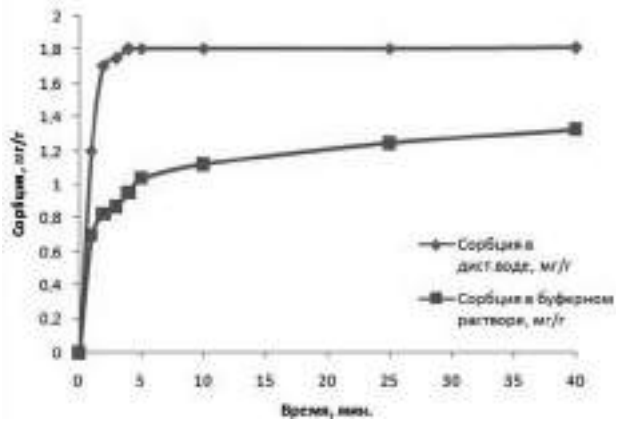


Рис. 4. Кинетика сорбции БКг гексагональным пирротином в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе

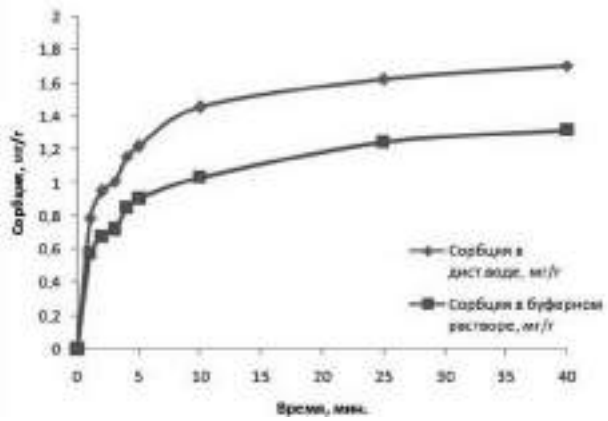


Рис. 5. Кинетика сорбции БКг пентландитом в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе

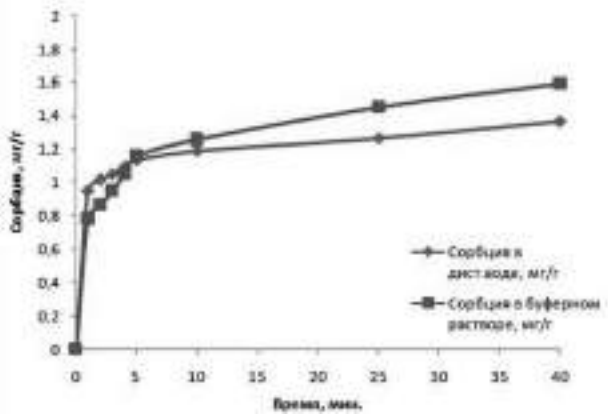


Рис. 6. Кинетика сорбции БКг халькопиритом в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе

Как видно, в нейтральной среде для всех минералов с увеличением продолжительности обработки происходит снижение скорости сорбции, причем ярче выражено это явление для халькопирита (рис. 6) и гексагонального пирротина (рис. 4). При этом скорость сорбции минералами существенно выше в начальный период времени, чем в дальнейшем – в первую же минуту сорбируется почти 50 % от общего количества ксантогената.

Следует отметить, что в нейтральной среде за 40 минут наибольшее количество БКс сорбировалось на поверхности халькопирита (рис. 8) и гексагонального пирротина (рис. 4) 1,81 мг/г, чуть меньше – 1,71 мг/г – на поверхности пентландита (рис. 5), моноклинный пирротин сорбировал лишь 1,37 мг/г БКс (рис. 3).

Обращает на себя внимание факт изменения величины сорбции БКс минералами при переходе от дистиллированной воды к щелочному буферу, резкое снижение зафиксировано на пентландите и гексагональном пирротине. Незначительно

уменьшилась величина сорбции собирателя на поверхности халькопирита, а на моноклинном пирротине даже несколько возросла.

Очевидно, эти явления связаны с состоянием поверхности минералов. В щелочных средах при окислении пирротина происходит интенсивное образование гидроксида $Fe(OH)_3$ и сульфатов [6]. Этот процесс приводит к снижению сорбции собирателя. Как известно, слабое окисление сульфида, которое имеет место при его хранении на воздухе, способствует его флотации сульфгидрильными собирателями, а сильное – вызывает отрицательные последствия [1].

Вследствие того, что моноклинный пирротин окисляется интенсивнее гексагонального, увеличение величины сорбции собирателя моноклинным пирротином в щелочной среде выражено сильнее, чем гексагональным. С этими же процессами связана и форма кинетических кривых (рис. 5, 6).

Значительное снижение скорости сорбции БКс на поверхности минералов с увеличением времени эксперимента и меньшее в сравнении с халькопиритом количество сорбированного собирателя можно объяснить тем, что пирротины окисляются быстрее.

В целом же, сорбция на минералах определяется устойчивостью их к окислению и убывает соответственно ряду: халькопирит, пентландит, пирротин.

Сорбционные свойства минералов определяются энергетическим состоянием поверхности [4]. В связи с этим, представляет интерес исследовать электродный потенциал поверхности синтезированных минералов (гексагонального пирротина и пентландита) в широком диапазоне pH при разном количестве добавленного ксантогената калия.

На рис. 7 представлена зависимость равновесного потенциала синтетического пентландита (а) и гексагонального пирротина (б) от pH раствора. Как видно, наблюдается закономерный сдвиг потенциала в отрицательную сторону с ростом величины водородного показателя. Зависимость качественно схожа с полученной в работе [4] для природных минералов. Потенциал синтетических минералов отрицательнее, чем природных. Возможно, это связано с наличием примесей других минералов, в частности, пентландита и с составом самого пирротина – соотношением содержаний железа и серы.

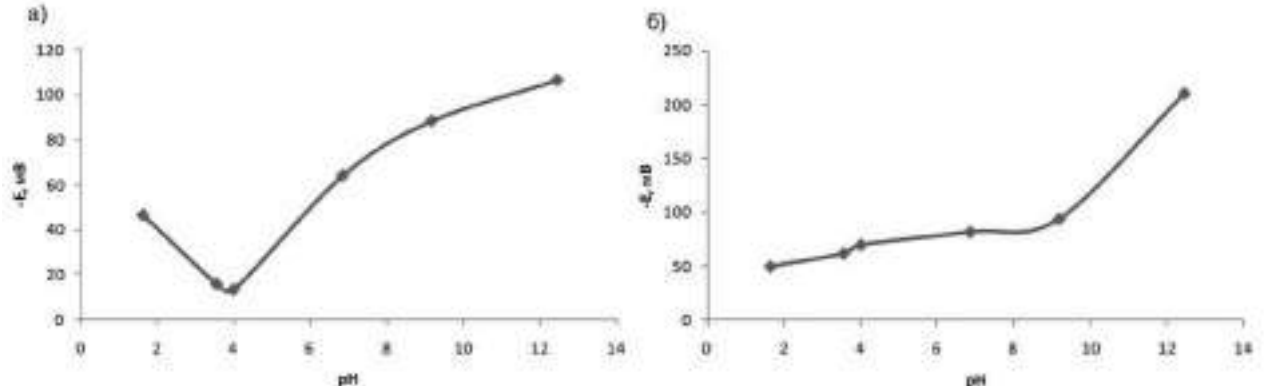


Рис. 7. Зависимость электродного потенциала пентландита (а) и гексагонального пирротина (б) от pH раствора

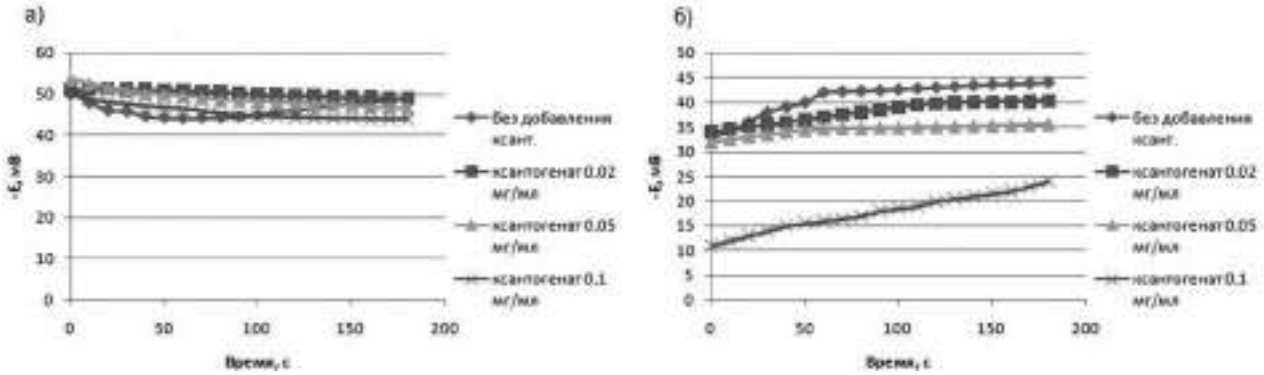


Рис. 8. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 1,65

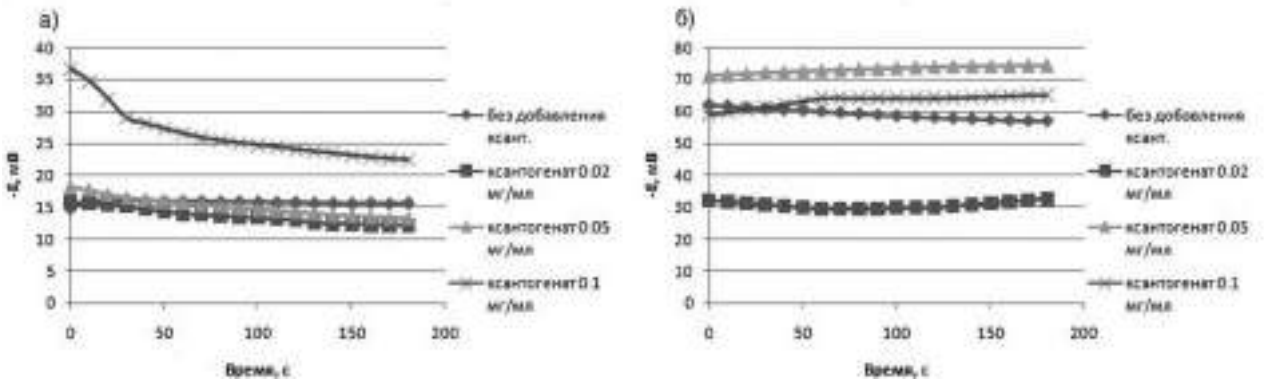


Рис. 9. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 3,56

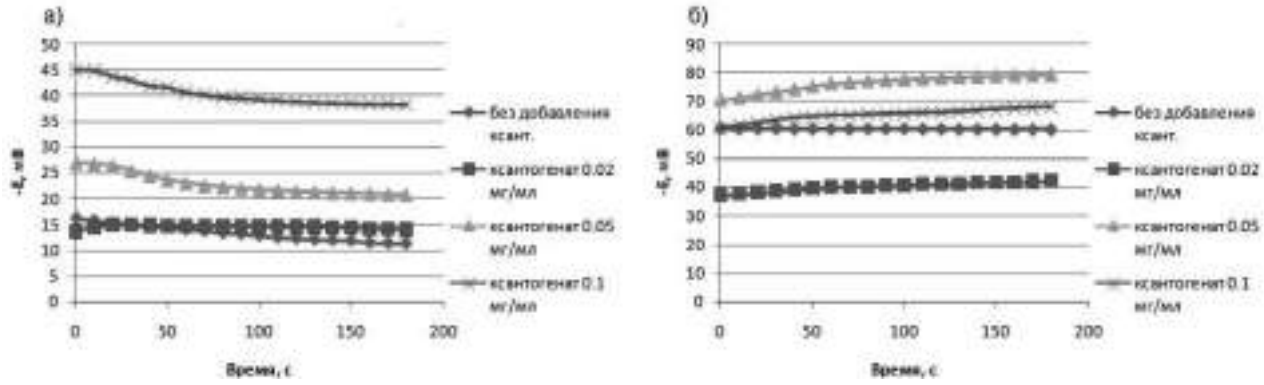


Рис. 10. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 4,01

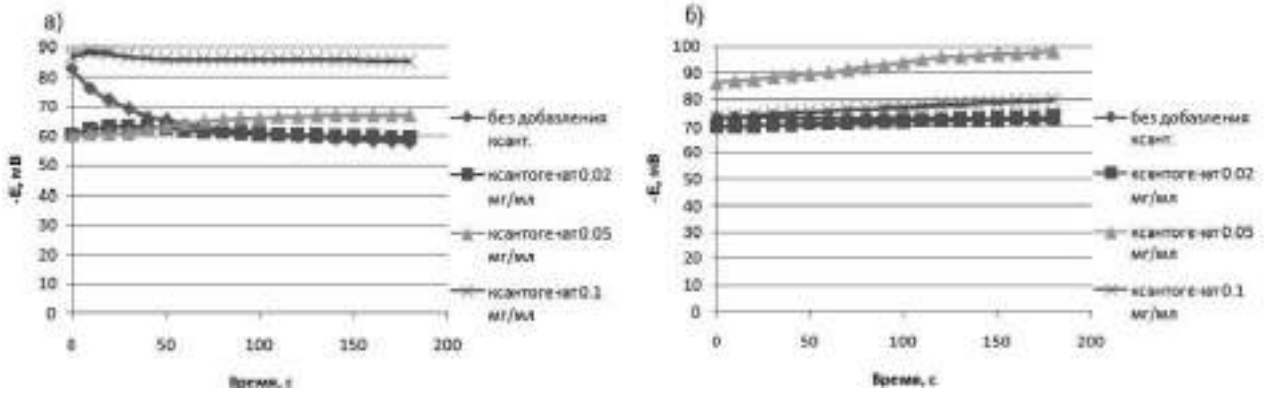


Рис. 11. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 6,86

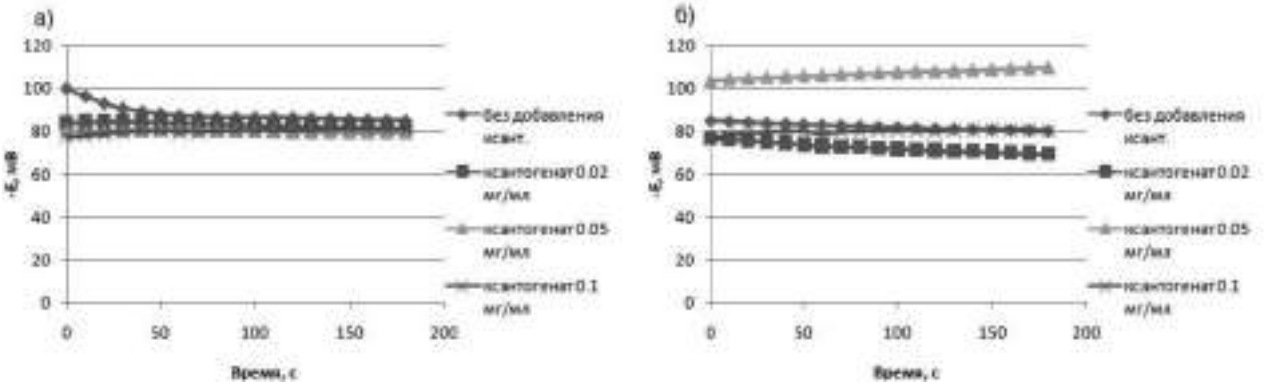


Рис. 12. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 9,18

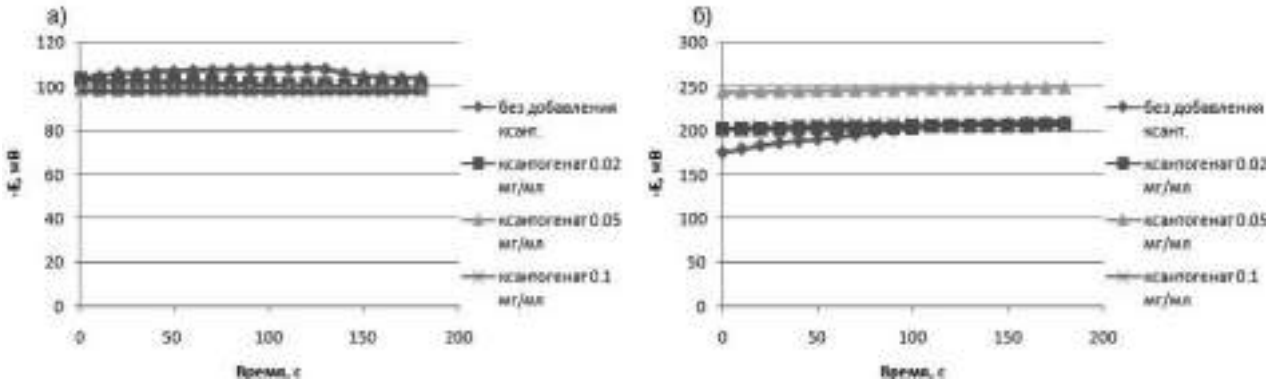


Рис. 13. Потенциал пентландита (а) и пирротина (б) в буферном растворе при pH 12,45

Представляло интерес проследить, как изменяется равновесный потенциал минералов при добавлении в раствор различного количества бутилового ксантогената калия в широком диапазоне величин водородного показателя растворов.

Результаты этих исследований приведены на рис. 8–13 (а) – пентландит; б) – пирротин).

В сильнокислом растворе (pH=1. 68) при добавлении БКс равновесный потенциал пентландита незначительно смещается в отрицательную сторону (0. 02 и 0. 05 мг/мл) либо практически не меняется (0. 1 мг/мл), в то время как потенциал гексагонального пирротина сдвигается в область менее электроотрицательных значений тем сильнее, чем большее количество собирателя вносится в раствор. С учетом того, что в кислых средах ксантогенаты неустойчивы, вероятно, продукты разложения катализируют процесс окисления поверхности пирротина, что приводит к смещению равновесного потенциала в положительную сторону.

В менее кислых растворах (pH=3. 56 и 4. 01) при малых концентрациях БКс (0. 02 и 0. 05 мг/л) равновесный потенциал пентландита смещается в положительную сторону, затем при большей концентрации собирателя – достаточно сильно в отрицательную. Причем для буферного раствора при pH=4. 01 сдвиг потенциала в область более электроотрицательных значений происходит уже при 0. 05 мг/мл БКс. Потенциал пирротина ведет себя схожим образом: при низкой концентрации собирателя смещается в положительную область (рис. 9, 10). При концентрациях БКс 0. 05 и 0. 1 мг/л потенциал минерала сдвигается в отрицательную сторону.

Вероятно, в этих условиях происходит закрепление на пирротине диксантогенида, образующегося на поверхности минерала по реакции:

$2C_4H_9OCSS^- - 2e^- = (C_4H_9OCSS)_2$.

Подобный механизм описан в работе [8].

В нейтральной среде характер изменения электродного потенциала пирротина качественно схож с изменением в слабокислых растворах (рис. 11).

При переходе к щелочным растворам (рис. 12, 13) потенциал пентландита при добавлении разного количества собирателя незначительно сдвигается в положительную сторону. В то же время оптимальной концентрацией БКс, обеспечивающей смещение потенциала гексагонального пирротина в отрицательную сторону, является 0. 05 мг/л. При меньшей и большей концентрации потенциал почти не отличается от потенциала пирротина в отсутствие собирателя.

Сдвиг электрохимического потенциала пирротина в область более электроотрицательных значений приводит к снижению сорбции БКс на минерале вследствие образования оксидов (гидроксидов) и сульфатов железа.

Выводы

Синтезированы образцы моноклинного и гексагонального пирротинов, пентландита и халькопирита. Состав подтвержден методом рентгенофазового анализа.

Изучена кинетика сорбции бутилового ксантогената калия полученными минералами в дистиллированной воде и щелочном буфере (pH 9. 18). Установлено существенное снижение скорости сорбции собирателя синтетическими минералами, а также уменьшение количества сорбированного ксантогената, вероятно, связанное с изменением поверхности исследованных сульфидов. Например, форма кинетических кривых пирротинов объясняется их быстрым окислением и образованием на поверхности оксидов (гидроксидов) и сульфатов трехвалентного железа.

В широком диапазоне pH измерены равновесные электродные потенциалы синтетического гексагонального пирротина и пентландита в бу-

ферных растворах и при добавлении бутилового ксантогената калия. Смещение потенциала в отрицательную сторону при добавлении ксантогената обусловлено сорбцией диксантогенида, образующегося при окислении ксантогената на поверхности пирротина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глембоцкий В. А., Классен В. И. Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. М.: Недра, 1981. С. 289–291.
2. Макаров Д. В. Сульфиды в техногенных отходах. Изучение влияния продуктов окисления минералов на их технологические свойства и окружающую среду. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co, KG. 2011. 294 с.
3. Матухин В. Л., Петров Г. И., Хабибуллин И. Х., Корзун Б. В., Фадеева Е. А. Мессбауэровские исследования природного и синтетического халькопирита/ // Межд. научной конф. Актуальные проблемы физики твердого тела: Сборник докладов. Минск: ОИФТТП НАН Беларуси, 2007. Т. 2. С. 49–51.
4. Хабарова И. А. Повышение контрастности физико-химических и флотационных свойств пирротина и пентландита на основе использования электромагнитного импульсного воздействия. Автореферат канд. дисс. М.: 2011, 22 с.
5. Чантурия В. А. Новые технологические процессы комплексного извлечения ценных компонентов из минерального сырья: современное состояние и основные направления развития // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 3. С. 235–242.
6. Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов: теория и практика флотации. М.: Руда и металлы, 2008. 272 с.
7. Чантурия В. А., Макаров В. Н., Макаров Д. В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. 218 с.
8. Bozkurt V., Xu Z., Finch J. A. Pentlandite/pyrrhotite interaction and xanthate adsorbtion // Int. J. Miner. Proc. 1998. V. 52. P. 203–214.
9. Kullerud G. Sulfide studies // Researches in geochemistry. Ed. Abelson P. H. New York: John Wiley and Sons Inc. 1967. V. 2. P. 286–321.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5

Щипцов В. В., Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Технологическая минералогия в развитии минерально-сырьевой базы России и роль комиссии технологической минералогии РМО 8

Левченко Е. Н. Комплексные минералого-аналитические исследования – основа прогнозной оценки технологических свойств редкометалльных руд и россыпей на ранних стадиях ГРР 28

Мелентьев Г. Б. Минеральные новообразования в продуктах пиро- и гидрохимической переработки труднообогатимого и техногенного сырья 34

Делицын Л. М., Рябов Ю. В., Мелентьев Г. Б., Магазина Л. О., Вальяно Г. Е. Микроминералогия фосфатно-ниобиевых руд месторождения Белая Зима и ее значение в процессах обогащения и переработки 47

Астахова Ю. М., Быстрова А. А., Быстров И. Г., Шувалова Ю. Н., Якушина О. А., Ружицкий В. В. Минералого-технологические особенности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского рудного поля 59

Сычева Н. А., Иоспа А. В., Мартиросян О. В. Особенности монацита, влияющие на его извлечение из редкоземельно-железных руд 62

Конеев Р. И., Халматов Р. А., Намазбаев Ш. Н., Утяганов М. А. Наноминералогия и технологические особенности золотых и золото-серебряных руд эндогенных месторождений Западного Узбекистана 65

Усманова Н. Ф., Брагин В. И., Меркулова Е. Н., Жижаев А. М. Геохимические исследования золотоносной руды коры выветривания 71

Ожогин Д. О. Минералогические критерии оценки качества нетрадиционных золотосодержащих руд 75

Быстров И. Г., Пирогов Б. И. Использование математического аппарата для оценки минералого-технологических особенностей руд 77

Войтеховский Ю. Л. Модальный анализ горных пород под микроскопом: состояние, проблемы и перспективы метода 83

Сметанников А. Ф., Оносов Д. В., Оносова Е. Ф. Зональность вещественного состава солеотвалов 90

Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Дубинчук В. Т., Ружицкий В. В. Технологические свойства кварца Карело-Кольского региона 96

Первунина А. В., Мясникова О. В. Минералого-технологические особенности низкоуглеродистых пород Нигозерского месторождения 104

Ильина В. П., Фролов П. В. Особенности минералого-технологических свойств ультрамафитов пироксенового состава как высокомагнезиального минерального сырья Карелии 111

Жерновский И. В., Нелюбова В. В., Строкова В. В., Осадчий Е. Г. Минералообразование в вяжущих гидротермального твердения системы «известь – гранитное НБ» (по результатам рентгенографических исследований) 118

Якушина О. А., Кожевников Д. А., Хозяинов М. С. Прогнозирование качества и обогатимости минерального сырья по рентгенотомографическим данным 124

Чертов А. Н., Горбунова Е. В., Алехин А. А., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Результаты экспериментальных исследований селективных свойств образцов мусковитовых кварцитов (Восточная Хизоваара) для изучения возможности их обогащения оптическим методом 129

Туресебеков А. Х., Аллабергенов Р. Д., Шарипов Х. Т. Клинкер и шлаки цветной металлургии Узбекистана: технология и минералогия 138

Кевлич В. И. Минеральный состав и микропарагенезис включений в цирконе как важный критерий при разработке технологических схем сепарации циркона 142

Красавцева Е. А., Макаров Д. В. Синтез и исследование сорбционных свойств сульфидов переменного состава 150

CONTENTS

INTRODUCTION 5

Shchiptsov V. V., Pirogov B. I., Ozhogina E. G., Kotova O. B. Technological mineralogy in the development of mineral resource base of Russia and the role of the Commission's technological mineralogy RMS 8

Levchenko E. N. Complex mineralogical and analytical studies are the basis for forecasting the evaluation of technological properties of rare metal ores and placers in the early stages of geological exploration 28

Melent'ev G. B. Mineral neoplasms in products of pyro- and hydrochemical processing of refractory and technogenic raw materials 34

Delitsyn L. M., Ryabov Yu. V., Melent'ev G. B., Magazina L. O., Valyano G. E. Micromineralogy of phosphate and niobium containg ores of Belaya Zima deposit and their significancy in beneficiation and treatment processes 47

Astahova Y. M., Bystrova A. A., Bystrov I. G., Shuvalova Y. N., Yakushina O. A., Ruzhitsky V. V. Mineralogical and technological features of pyrochlore, monazite-krandallitovyh ores of Tomtor field 59

Sycheva N. A., Iospa A. V., Martirosyan O. V. Features monazite, influencing its extraction of rare earth iron ore 62

Koneev R. I., Khalmatov R. A., Namazbaev Sh. N., Utyaganov M. A. Nanomineralogy and technological features of gold and gold-silver ores of endogenous deposits in the West of Uzbekistan 65

Usmanova N. F., Bragin V. I., Merkulova E. N., Zhizhaev A. M. Geochemical investigations of the golden ores in the weathering crust 71

Ozhogin D. O. Mineralogical criteria of quality estimation of non-traditional gold ores 75

Bystrov I. G., Pirogov B. I. Application the mathematical techniques to evaluate the mineralogical and technological characteristics of ores 77

Voytekhovsky Yu. L. Rock modal analysis through the microscope: the state, problems and prospects of the method 83

Smetannikov A. F., Onosov D. V., Onosova E. F. Zoning of material composition of salt plants 90

Rakov L. T., Scamitskaya L. S., Dubinchuk V. T., Ruzhitsky V. V. Technological properties of quartz of the Karelian-Kola region 96

Pervunina A. V., Myasnikova O. V. Mineralogical and technological features of low-carbon rocks of the Nigozersky deposit 104

Ilyina V. P., Frolov P. V. Characteristic mineralogical-technological properties of ultramafic rocks of pyroxene composition as high-Mg mineral raw materials of Karelia 111

Zhernovsky I. V., Nelyubova V. V., Strokova V. V., Osadchy E. G. Mineral formation in hydrothermal hardening binders of system «lime-granite NB» (based on radiographic analysis) 118

Yakushina O. A., Kozhevnikov D. A., Khozyainov M. S. X-ray Computed tomography for ores quality and washability evaluation 124

Chertov A. N., Gorbunova E. V., Alehin A. A., Scamitskaya L. S., Bubnova T. P. Results of pilot studies of the selective properties of muscovite quartzite samples (East Hizovaara) to study the possibility of their enrichment by the optical method 129

Turesebekov A. H., Allabergenov R. D., Sharipov H. T. Clinker and slags of non-ferrous metallurgy in Uzbekistan: technology and mineralogy 138

Kevlich V. I. Mineral composition and microparagenesis of inclusions in zircon, as an important criteria in the development of technological schemes for the separation of zircon 142

Krasavtseva E. A., Makarov D. V. Synthesis and study of sorption properties of sulphides of variable composition 150

РЕФЕРАТЫ

УДК 553.08 + 552.12

Щипцов В. В., Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Технологическая минералогия в развитии минерально-сырьевой базы России и роль Комиссии технологической минералогии РМО // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 8–27: ил. 26. Библиогр. 38 назв.

Показано, что истоки технологической минералогии связаны с именем академика В. М. Севергина, который в конце XVIII века ввел понятие «технологическая и экономическая» минералогия», что и определило дальнейшую традиционную практическую направленность российской минералогии. Выделены определенные этапы развития, среди которых существенным является период 1921–1955 гг. На следующем этапе происходит претворение принципов технологической минералогии в практике геологоразведочных работ и горнорудного производства (1956–1982 гг.) и создание Комиссии по технологической минералогии ВМО к началу 1984 г. Отражены результаты ее деятельности по трем этапам и обоснованы главнейшие направления развития технологической минералогии.

It is shown that the origins of technological mineralogy are connected with the name of Academician V. M. Severgin, who at the end of the 18th century introduced the term «technological and economic» mineralogy, which determined the further traditional practical direction of Russian mineralogy. Certain stages of development have been singled out, among which the period from 1921 to 1955 is significant. The next step is the implementation of the principles of technological mineralogy in the practice of geological exploration and mining (1956–1982) and the establishment of the All-Russian Mineralogical Society of Technology Mineralogy Commission by early 1984. The results of its activities in three stages are reflected and the main trends in the development of technological mineralogy are substantiated.

УДК 550.08

Левченко Е. Н. Комплексные минералого-аналитические исследования – основа прогнозной оценки технологических свойств редкометалльных руд и россыпей на ранних стадиях ГРР // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 28–34: ил. 6, табл. 3. Библиогр. 7 назв.

Геологическое изучение недр проводится по стадиям и этапам, характеризующимся различными целями, задачами и объемами. Целесообразность геологического изучения зависит от качественной характеристики изучаемого минерального сырья. Качество минерального сырья, или извлекаемая ценность, определяется его технологическими свойствами. В статье показана практика использования комплексных минералого-аналитических исследований.

Geological study of subsoil is carried out in stages and stages, characterized by different goals, objectives and volumes. The expediency of geological study depends on the qualitative characteristics of the mineral material being studied. The quality of mineral raw materials, or recoverable value, is determined by its technological properties. The paper shows the practice of using complex mineralogical and analytical studies.

УДК 622.7:553.04

Мелентьев Г. Б. Минеральные новообразования в продуктах пиро- и гидрохимической переработки труднообогатимого и техногенного сырья // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 34–47: ил. 5, табл. 2. Библиогр. 25 назв.

В статье проанализированы технолого-минералогические аспекты использования прямых физико-химических методов переработки труднообогатимого, бедного и техногенного рудного сырья. Акцентируется внимание на примерах концентрирования особо ценных компонентов в минеральных новообразованиях пиро- и гидрохимических технологических процессов. Обосновывается необходимость междисциплинарного развития технологической минералогии в направлениях повышения эффективности и экологизации недропользования и перерабатывающих производств.

The article analyzes the technological and mineralogical aspects of the use of direct physico-chemical methods for processing refractory, poor and technogenic ore raw materials. Attention is focused on the examples of concentrating particularly valuable components in the mineral formations of pyro- and hydrochemical processes. The necessity of interdisciplinary development of technological mineralogy in the directions of increasing efficiency and ecologization of subsoil use and processing industries is substantiated.

УДК 549:622.7

Делицын Л. М., Рябов Ю. В., Мелентьев Г. Б., Магазина Л. О., Вальяно Г. Е. Микроминералогия фосфатно-ниобиевых руд месторождения Белая Зима и ее значение в процессах обогащения и переработки // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 47–59: ил. 9, табл. 13. Библиогр. 6 назв.

В статье приведен анализ микроминералогической специфики состава фосфатно-ниобиевых охристых карбонатитовых руд месторождения Белая Зима. Его

результаты позволили обосновать новые варианты обогащения и переработки этого вида сырья. Полученные результаты позволяют также обосновать перспективы обогащения и переработки подобных руд: разведанных (Томторское) и разведываемых (Чуктуконское) месторождений.

In the article the micromineralogical specifity of phosphate – niobium – carbonatite ocherores from Belaya Zima deposit is given. The rceived results have provided the new beneficiation and processing variantes of this mineral materials to substantiate. The obtained results allow also to permit the perspectives of beneficition and processing of similar ores, which have been already explored (Tomtor deposit) and which are situated in exploring (Chuktukonskoye deposit).

УДК 549.08

Астахова Ю. М., Быстрова А. А., Быстров И. Г., Шувалова Ю. Н., Якушина О. А., Ружицкий В. В. Минералого-технологические особенности пирохлор-монацит-крандаллитовых руд Томторского рудного поля // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 59–61: ил. 4.

В работе приведены результаты минералого-технологического исследования редкоземельных и редкометальных руд Томторского месторождения. Исследования выполнены с целью оценки их технологических свойств, которая позволяет определить схему их обогащения.

The results of mineralogical and technological study of rare earth and metal mineralization from the Tomtor ore cluster. Researches executed in order to assess their technological properties that allow determining the scheme of minerals separation process.

УДК 549.08

Сычева Н. А., Иоспа А. В., Мартиросян О. В. Особенности монацита, влияющие на его извлечение из редкоземельно-железных руд // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 62–65: ил. 3, табл. 2.

В статье описаны особенности монацита из месторождения латеритных кор выветривания Чуктукон: морфологические выделения, гранулярный и химический состав, связь с рудообразующими минералами, а также влияние особенностей монацита на технологические свойства, которые определяют невозможность селективной экстракции и обогащения физическими методами.

The article describes the features of monazite from lateritic weathering crust deposits Chuktukon: morphology secretions, granular and chemical composition, the relationship with the ore-forming minerals. The influence of the features of monazite on its technological properties, which determine the impossibility of selective extraction and enrichment of physical methods.

УДК 546.59:549(575.1)

Конеев Р. И., Халматов Р. А., Намазбаев Ш. Н., Утяганов М. А. Наноминералогия и технологические особенности золотых и золото-серебряных руд эндогенных месторождений Западного Узбекистана // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 65–70: ил. 4, табл. 2. Библиогр. 11 назв.

Рассмотрены наноминералогия золота и вещественный состав руд золотых и золото-серебряных месторождений Западного Узбекистана. Выделено 7 минерально-геохимических типов руд – /Au-W/Au-Bi-Te/Au-As/Au-Ag-Te/Au-Ag-Se/Au-Sb/Au-Hg/. Каждому типу руд соответствует определенное соединение золота: нанозолото – Fe(AuAsS) – мальдонит – петцит – фишессерит – ауростибит – Hg-золото и соответствующие неповторяющиеся микро-наноансамбли теллуридов, селенидов, интерметаллидов, сульфосолей и сульфидов. В месторождениях в зависимости от вертикальной минерально-геохимической зональности и эрозионного среза совмещается от двух до пяти типов руд. Изменение состава руд, соединений золота и его микро-наноансамблей влияет на технологические свойства и методы обогащения руд.

Considered nanomineralogy gold and composition of ores of gold and gold-silver deposits in Western Uzbekistan. Emphasis 7 mineral and geochemical ore types – /Au-W/Au-Bi-Te/Au-As/Au-Ag-Te/Au-Ag-Se/Au-Sb/Au-Hg/. Each type corresponds to a specific ore gold compound: nanogold – Fe(AuAsS) – maldonite – petzite – fishesserite – aurostibite – Hg-gold and related non-recurring micro-nanoansambles tellurides, selenides, intermetallic compounds, sulphides and sulphosalts. In the fields, depending on the vertical mineral and geochemical zoning and erosion combined from 2 to 5 types of ores. Changing the composition of ore, gold compounds and micro-nanoansambles in connection with mineral geochemical zoning affects ore processing properties.

УДК 549; 543.428.3

Усманова Н. Ф., Брагин В. И., Меркулова Е. Н., Жижаев А. М. Геохимические исследования золотоносной руды коры выветривания // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 71–75: ил. 6. Библиогр. 17 назв.

Представлены результаты комплексных исследований золотоносный руды коры выветривания с применением минералогического и геохимического анализов. По методике геохимического анализа изучены формы нахождения золота с обменной, органической,

карбонатной составляющей, с аморфными и кристаллическими оксидами железа, с сульфидами металлов. Определенные мобильные формы золота, связанные с первыми тремя этапами выщелачивания, могут служить технологическими потерями при гравитационном или флотационном обогащении.

The results of complex research of weathered gold bearing ore with help of mineralogical and geochemical analysis have been presented. Using sequential geochemical analysis technique the gold distribution in different geochemical fractions: exchangeable, organic, carbonate, amorphous or crystalline iron oxides and metal sulfides was defined. Movable gold connected with first three fractions can be the reason of metal losses in technological processes like floatation or gravitation.

УДК 553.411.071

Ожогин Д. О. Минералогические критерии оценки качества нетрадиционных золотосодержащих руд // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 75–77: ил. 1. Библиогр.

Главными минералогическими критериями оценки качества руд являются природные и техногенные золотосодержащие ассоциации, форма нахождения золота, гранулярный состав, особенности и физические свойства золотосодержащих минералов или техногенных фаз. В качестве примера рассмотрены уран-ванадиевые руды месторождений Карелии.

Main mineralogical criteria of ores quality estimation are natural or technogenic gold-bearing association, form of gold presence, granular composition, features and physical properties of the gold-bearing minerals or artificial phases. We present the investigation uranium-vanadievye the ores of the Karelia layers as on example.

УДК 51–74:549.08

Быстров И. Г., Пирогов Б. И. Использование математического аппарата для оценки минералого-технологических особенностей руд // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 77–83: ил. 4. Библиогр.

В работе рассмотрены особенности применения математического аппарата для оценки генетических параметров руд и минералов, а также определения их влияния на минералогические характеристики компонентов с прогнозированием технологических свойств последних.

In this article we consider the possibility of applying mathematical device for determination of genetic parameters of ore and mineral, and their influence on the mineralogical characteristics of the components with the prediction of the technological properties of the latter.

УДК 552.086

Войтеховский Ю. Л. Модальный анализ горных пород под микроскопом: состояние, проблемы и перспективы метода // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 83–89: ил. 7. Библиогр. 24 назв.

В статье дан краткий исторический обзор модального анализа горных пород под микроскопом. Обращено внимание на то, что его математические основы не исчерпаны, несмотря на мощные вычислительные средства. Показано, что ссылка на принцип Кавальери некорректна и затуманивает существо метода. Его перспективы связываются с использованием стереологического анализа.

Presented in the paper is a brief historical review of the modal analysis of rocks under the microscope. It is emphasized that the mathematical background of the method is not exhausted up to now despite the fact that it is highly computerized. The references to the Cavalieri principle are shown to be incorrect and shade the problem. It is concluded that the higher precision of the method needs the stereological analysis to be developed.

УДК 553. 085:553.086

Сметанников А. Ф., Оносов Д. В., Оносова Е. Ф. Зональность вещественного состава солеотвалов // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 90–96: ил. 12, табл. 5. Библиогр.

На основе исследований вещественного состава галитовых отходов, а также нерастворимых остатков этих отходов сделан вывод о низкой степени преобразования солевой части солеотвала. Образуется зона изменений глубиной 0,5 м с литификацией основного объема галитовых отходов в виде техногенной соляной породы – галитита. В нерастворимом остатке отходов формируются минеральные новообразования, концентрирующие элементы-микропримеси в промышленно значимых количествах. Этот процесс связывается с проявлением метаморфизма, в условиях гипергенеза.

On the basis of the material composition of halite waste research and insoluble residues of these wastes concluded that a low degree of conversion of the salt parts saltheap. Formed area changes with the depth of 0.5 m halite lithification main volume of waste in the form of man-made rock salt – galitita. The insoluble residue of waste generated mineral growths concentrating trace elements in commercially significant quantities. This process is associated with the manifestation of metamorphism in a supergene.

УДК 549. 50:553.21

Раков Л. Т., Скамницкая Л. С., Дубинчук В. Т., Ружицкий В. В. Технологические свойства кварца Карело-Кольского региона // Результаты междисциплинарных исследований в технологической мине-

ралогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 96–104: ил. 6, табл. 4. Библиогр. 12 назв.

Технологические свойства кварца определяются особенностями кристаллической структуры, что важно при оценке перспективности кварцевого сырья. Формирование кристаллической структуры кварца в естественных условиях связано с последовательной динамической рекристаллизацией минерала.

Technological properties of quartz crystal structure determined by the features that is important in assessing the prospects of quartz. Quartz crystal structure formation in vivo is associated with sequential dynamic recrystallization mineral.

УДК 549.08

Первунина А. В., Мясникова О. В. Минералого-технологические особенности низкоуглеродистых пород Нигозерского месторождения // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 104–111: ил. 4. табл. 3. Библиогр. 10 назв.

В статье приводятся результаты исследования низкоуглеродистых шунгитсодержащих пород (содержание шунгитового вещества в породе до 5 %) Нигозерского месторождения (Карелия). Породы представлены в объеме кондопожской свиты калевийского надгоризонта нижнего протерозоя.

Приведены результаты исследования минерального и химического состава низкоуглеродистых песчаников и алевролитов месторождения с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофлюоресцентной спектрометрии. Определены минералогические и литохимические особенности пород. Представлены данные исследований физических и механических свойств песчаников и алевролитов, необходимые для выбора способа переработки и направления применения. Показаны результаты лабораторных исследований физико-механических свойств различных фракций щебня, полученных в результате дезинтеграции низкоуглеродистых пород. Выполнена оценка качества фракций щебня для применения в строительной индустрии.

In the article results of research of low-carbon schungite-bearing rocks (the content of shungite substance in the rock up to 5 %) of the Nigozersky deposit (Karelia) are given. The rocks are represented in the Kondopoga suite of the Kalevian overhorizontal of the Lower Proterozoic.

The results of the investigation of the mineral and chemical composition of low-carbon sandstones and siltstones of the deposit using the methods of electron microscopy and X-ray fluorescence spectrometry are presented. Mineralogical and lithochemical features of rocks have been determined. Data on the physical and mechanical properties of sandstones and siltstones are presented, which are necessary for selecting the method of processing and the direction of application. The results of laboratory studies of the physical and mechanical properties of various fractions of crushed stone obtained as a result of the disintegration of low-carbon rocks are shown. The estimation of quality of fractions of crushed stone for application in the building industry is executed.

УДК 552.321.6+553.67+691.4(470.22)

Ильина В. П., Фролов П. В. Особенности минералого-технологических свойств ультрамафитов пироксенового состава как высокомагнезиального минерального сырья // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 111–118: ил. 6, табл. 2. Библиогр. 12 назв.

Приведены результаты исследования ультрамафитов пироксенового состава как высокомагнезиального минерального сырья на примере разных месторождений: хромовых руд Аганозерское, блочного камня Сопка Бунтина, проявления полиминеральных руд Гайкольское. Изучено влияние магнийсодержащих техногенных продуктов горнодобывающих предприятий на технологические свойства строительных облицовочных материалов: водопоглощение, общую усадку – в условиях низкотемпературного обжига и разработаны составы теплоизоляционной и малоусадочной керамики с форстеритовой кристаллической фазой и авгитовой на базе данного вида нетрадиционного сырья.

The results of the study of ultramafic rocks of pyroxene composition as high-Mg mineral raw materials are reported, and examples from various deposits such as Aganozerskoye chromium deposit, Sopka Buntina dimension stone deposit and Gaikolskoye polymict ore occurrence are presented. The effect of the Mg-bearing technogeneous products of mining companies on the technological properties of construction facing materials, such as water absorption and total shrinkage upon low-temperature roasting, was estimated, and the composition of heat-insulating and low-shrinkage ceramics with a forsteritic crystalline phase and an augite phase was developed on the basis of this type of non-conventional raw material.

УДК 691.335

Жерновский И. В., Нелюбова В. В., Строкова В. В., Осадчий Е. Г. Минералообразование в вяжущих гидротермального твердения системы «известь – гранитное НВ» (по результатам рентгенографических исследований) // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 118–124: ил. 8, табл. 3. Библиогр. 6 назв.

На модельных составах методом полнопрофильного количественного РФА определена кинетика ми-

нералообразования при гидротермальном синтезе вяжущего системы «известь – гранитное наноструктурированное вяжущее (НВ)». Установлены тренды изменения концентрации кристаллических компонентов исходного петрофонда вяжущих при формировании гидратных силикатных и алюмосиликатных образований кальция. Предложена феноменологическая модель минералообразования в системе вяжущего гидротермального синтеза «известь – гранитное НВ». Полученные результаты позволяют рассматривать данную вяжущую систему как вяжущее с суперпозицией механизмов твердения – гидратационного и геополимеризационного.

On the model compositions with the full-profile quantitative X-ray phase analysis the kinetics of mineral formation during hydrothermal synthesis of the binder system “lime – granite nanostructured binder (NB)” was determined. Trends of changing of the crystal components concentrationof the original petrofond of binder during the generatiom of hydrated silicate and calcium alumino-silicate formationswere established. A phenomenological model of mineral binder system of hydrothermal synthesis “lime – granite NB” was suggested. These results allow considering this binding system as the binder with a superposition of hardening mechanisms – hydrational and geopolymerizing.

УДК 549.08:550.8

Якушина О. А., Кожевников Д. А., Хозяинов М. С. Прогнозирование качества и обогатимости минерального сырья по рентгенотомографическим данным // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 124–129: ил. 3. Библиогр. 7 назв.

Обсуждаются возможности использования метода рентгеновской (микро) томографии в комплексе современных физических методов изучения минерального сырья для решения задач технологической, в том числе получать информацию о минеральном составе и морфоструктурных характеристиках, разделения на рудные и породообразующие минералы, давать прогнозную оценку качества полезных ископаемых. Изображения томограмм визуализируют (устанавливают) размеры и характер распределения фаз в тонком плоском слое исследуемого объекта, т. е. позволяют получать данные о морфоструктурных особенностях минерального вещества, по которым можно прогнозировать качество, технологические свойства сырья и его поведение в процессах переработки.

The possibility to use X-ray Computed (micro)Tomography in a complex of modern laboratory physical testing methods for the study of mineral raw materials for technological mineralogy tasks, including to obtain data on mineral composition and morphostructural characteristics, separation of ore and rock-forming minerals, prognosis the quality of raw matters. The data obtained result in phase segmentation, ore and rock-forming minerals separation, raw matters quality prognosis being technological mineralogy tasks.

УДК 622 (38.51+52.45)

Чертов А. Н., Горбунова Е. В., Алехин А. А., Скамницкая Л. С., Бубнова Т. П. Результаты экспериментальных исследований селективных свойств образцов мусковитовых кварцитов (Восточная Хизоваара) для изучения возможности их обогащения оптическим методом // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 129–137: ил. 7, табл. 4. Библиогр. 11 назв.

Выполнены экспериментальные исследования селективных свойств образцов мусковитовых кварцитов, позволяющие на стадии предконцентрации пород вывести в хвосты технологический продукт с небольшим содержанием мусковита. Показана возможность разделения минерального сырья оптическим методом.

Experimental studies of the selective properties of samples of muscovite quartzites have been carried out, allowing a technological product with a small amount of muscovite to be taken out at the preconcentration stage of the rocks. The possibility of separating mineral raw materials by the optical method is shown.

УДК 669. 054. 8:669.5

Туресебеков А. Х., Аллабергенов Р. Д., Шарипов Х. Т. Клинкер и шлаки цветной металлургии Узбекистана: технология и минералогия // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 138–142: табл. 5. Библиогр.

Приведены основные минералого-химические характеристики клинкера цинкового и шлаков медного производств. Показана причинно-следственная связь этих характеристик и технологической упорности указанного техногенного сырья для традиционных способов переработки. Показана эффективность нетрадиционной гидрохимической технологии переработки с использованием предварительной механофизико-химической активации сырья.

Resulted basic mineral – chemical descriptions over of clinker of zinc and slags are brought copper productions. Reason – investigation connection of these descriptions is shown with technological persistent of the indicated technogenic raw material for the traditional methods of processing. Efficiency of hydrochemical unconventional technology of processing is shown with the use of the preliminary mechanical physical chemical activating of raw material.

УДК 622.0172:549.514.81

Кевлич В. И. Минеральный состав и микропарагенезис включений в цирконе как важный критерий при разработке технологических схем сепарации циркона // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 142–149: ил. 10, табл. 1. Библиогр. 15 назв.

В статье приводятся результаты минералого-технологического изучения циркона, парагенезиса включений в цирконе, их влияния на основные технологические свойства и поведение в процессах сепарации. Полученные данные позволили обосновать разработку схем выделения циркона из бедных и труднообогатимых лейкократовых и меланократовых горных пород и руд.

The article presents the results of mineralogical and technological study of zircon inclusions in zircon paragenesis their impact on the basic technological properties and behavior in the processes separation. The data allowed the development of schemes to justify allocation of CIR-Law of the poor and refractory leucocratic and melanocratic rocks and ores.

УДК 549.057

Красавцева Е. А., Макаров Д. В. Синтез и исследование сорбционных свойств сульфидов переменного состава // Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 150–156: ил. 13. Библиогр. 9 назв.

Исследована кинетика сорбции бутилового ксантогената калия моноклинным и гексагональным пирротинами, пентландитом и халькопиритом в дистиллированной воде и щелочном буферном растворе. В обоих случаях для сульфидов в воде и щелочных растворах отмечено снижение скорости сорбции.

The study deals with sorption kinetics of butyl potassium xanthate with synthetic monoclinic pyrrhotite, hexagonal pyrrhotite, pentlandite andchalcopyrite in distilled water and an alkaline buffer solution. In the both cases of sulfides in water and alkaline solutions, the sorption's rate were note to decrease.

Научное издание

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Сборник статей XI Российского семинара
по технологической минералогии

Печатается по решению Ученого совета
Института геологии КарНЦ РАН

Издано в авторской редакции

Сдано в печать 30.08.2017 г. Формат 60x84 1/8.
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 16,6. Усл.-печ. л. 19,1.
Тираж 150. Заказ № 446

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50