

Российская Академия Наук



RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
KARELIAN RESEARCH CENTRE
INSTITUTE OF GEOLOGY



**RESULTS OF FUNDAMENTAL AND
APPLIED STUDIES ON METHODS FOR
TECHNOLOGICAL EVALUATION OF METALLIC
ORES AND INDUSTRIAL MINERALS
AT THE EARLY STAGES OF GEOLOGICAL
PROSPECTING**

Edited by Dr.Sc.Vladimir V.Shchiptsov

Petrozavodsk
2006

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ



**РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И
ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ
МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ**

Под редакцией д.г.-м.н. В.В.Щипцова

Петрозаводск
2006

Рецензент вице-президент РМО, профессор, докт.геол.-мин.наук **Ю.Б.Марин**

*Настоящее издание осуществлено при финансовой поддержке
Министерства промышленности и природных ресурсов Республики Карелия*

ISBN 5-9274-0281-X

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

*Светлой памяти
профессора В.М.Изоитко
посвящается*



Изоитко Виктория Михайловна (1934-2003 гг.) – доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «Механобр-инжиниринг», председатель Комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества, национальный представитель России в Комиссии по прикладной минералогии Международной минералогической ассоциации. Такие скупые биографические данные о талантливом исследователе, посвятившем свою жизнь развитию процессов обогащения полезных ископаемых и освоению в нашей стране новых месторождений, подвели итог всей жизни. И трудно до сих пор осознать, что нет с нами замечательного и принципиального исследователя Виктории Изоитко. Она получила хорошую научную и практическую школу, окончив Ленинградский горный институт и затем аспирантуру под руководством заведующего кафедрой месторождений полезных ископаемых П.М.Татарина. В дальнейшем она плодотворно работала в институте Механобр под руководством члена-корреспондента В.И.Ревнивцева, участвовала в создании современного лабораторного центра по исследованию руд. В декабре 1988 года защитила докторскую диссертацию, стала профессором, активно участвовала в работе Комиссии по технологической минералогии Минералогического общества. На протяжении 15 лет она возглавляла эту Комиссию, достойно продолжая дело, начатое В.И.Ревнивцевым. В то время в заседаниях за чашкой чая принимали участие такие видные минералоги, как профессор Д.П.Григорьев, академик Н.П.Юшкин, профессор Б.И.Пирогов, профессор Л.К.Яхонтова и др. Именно к этому периоду относится тот факт, что технологическая минералогия определяется как одно из наиболее актуальных направлений минералогических исследований при ВМО. Фактически формируется новое научное направление 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.

Многие годы В.М.Изоитко в коллективе Механобра участвовала в геолого-технологическом картировании, проводимом на горно-обогатительных предприятиях страны. Достаточно сказать, что объектами детального геолого-минералогического изучения с целью технологической оценки были выбраны медно-молибденовые руды Сибири и Урала, медно-никелевые руды Талнахского рудного узла, молибден-вольфрамовые руды Тырныаузского месторождения и др.

Благодаря исследованиям В.М.Изоитко поле деятельности технологической минералогии расширяется. Технологическая минералогия приобретает тесную связь с особенностями экономического развития государства и вносит существенный вклад в решение проблемы рационального использования недр за счет достижения максимальной полноты и комплексного использования добываемого сырья, а также обеспечения повсеместной утилизации отходов. Результаты исследований изложены в десятках научных работ, в том числе в шести монографиях. Использование этих результатов в промышленном масштабе подтверждено семью авторскими свидетельствами и награждением В.М.Изоитко нагрудным знаком «Изобретатель СССР».

В.М.Изоитко уделяла большое внимание воспитанию научных кадров. Она подготовила ряд новых учебных курсов («Технологическая минералогия руд», «Техногенные месторождения как новый вид минерального сырья» и др.), которые читала в высших учебных заведениях, отечественных и зарубежных производственных организациях и научно-исследовательских институтах. В журнале «Обогащение руд» благодаря ее усилиям и стараниям появился постоянный раздел «Технологическая минералогия». Она создала научную школу, готовила докторов и кандидатов наук.

Большое признание приобрела изданная монография «Технологическая минералогия и оценка руд». Эта книга представляет собой опыт обобщения существующих материалов в области технологической минералогии и оценки руд. Проведена систематизация существующих данных по технологической минералогии руд цветных и благородных металлов и унификация ряда терминов.

Данные труды по технологической минералогии (выпуск 1) «Результаты фундаментальных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ» посвящаются памяти Виктории Михайловны. Многие авторы настоящего издания были хорошо знакомы с ней, их объединяли общие научные интересы. В ряде статей этого издания не только цитируется В.М.Изоитко, но авторы делятся своими теплыми воспоминаниями о выдающемся ученом, энтузиасте, активном члене Российского минералогического общества. Доброй памятью о Виктории Михайловне будет дальнейшая успешная деятельность Комиссии по технологической минералогии.

Президент Российского
минералогического общества
академик



Д.В.Рундквист

МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ И ПРИРОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ

Пирогов Б.И.

Российский государственный геологоразведочный университет (Москва),
Email: pirogov_bi @ inbox. ru

Еще в 1954 г. А.И. Гинзбург отмечал, что вовлечение в сферу практического 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 нового крупного месторождения, не требуя к тому же значительных капиталовложений. Он всегда призывал к комплексности изучения, оценки и переработки полезных ископаемых (ПИ). Именно, **технологическая минералогия (ТМ) объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков ПИ, технологических свойств минералов, направленные на разработку рациональных схем их обогащения, комплексное использование минерального сырья.** Она позволяет с единых позиций проследить весь ход изменений минерального вещества (МВ) литосферы через технологию обработки и переработки до накопления в литосфере отходов [1]. Разработку научной системы и методологии этого важнейшего направления прикладной минералогии следует увязывать с основами теории минералогии в целом, физики и химии твердого тела, достижениями таких наук, как поиски, разведка и оценка месторождений, обогащение, экономика и экология полезных ископаемых через:

– исследование эволюционных закономерностей развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом, учитывая, что минералы и их ассоциации (в целом вещественный состав, текстурно-структурные признаки и свойства ПИ (в том числе технологические) формируются на макро- микро- и наноуровне в единой геолого-техногенной системе (ЕГТС), определяя основные геолого-минералогические факторы их обогатимости и экологические особенности. Они отражают круговорот МВ в природе на различных уровнях его организации: *индивид (кристалл, зерно, частица) – агрегат (технологический агрегат малых частиц) – рудное тело (ПИ) – минералогическая аномалия (в т. ч., отвалы пустых пород и некондиционных ПИ, хвостохранилища – потенциальные техногенные МПИ) – минералогическое поле – ...;*

– понимание, что технологические свойства (ТС) минералов (магнитные, плотностные, полупроводниковые, люминесцентные, свойства поверхности и др.) являются функцией их конституции и генезиса, а потому их «жизнь», начатая в геологических процессах, продолжается в технологических аппаратах. Это отражает двойную природу ТС минералов [2] : с одной стороны, они определяются взаимосвязью с генезисом, конституцией и морфологией выделений, с другой – изменениями морфологии, конституции минералов и как следствие природных свойств их при рудоподготовке и обогащении. Информация о свойствах локализуется на различных уровнях минералогической «памяти» - морфологическом, изотопном, молекулярном, структурном, магнитном и т.п. Поэтому минералоги и технологи должны понять характер и особенности проявления ТС минералов, чтобы научиться управлять ими;

– учет в природных геологических и технологических системах иерархической систематики дискретного состояния вещества [2] в ряду образований: *минерал – микроминерал – квазикристаллы – фуллерены – аморфное вещество – коллоиды – наночастицы – кластеры.* Это позволяет по-новому подойти к минералого-технологической оценке комплексности, экологичности ПИ и отходов, разработке нестандартных методик их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономо-экологических технологий получения новых нетрадиционных видов МС (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, дистен, гранаты и др.), постоянно расширяя области их применения;

– использование онтогенического подхода в комплексе с традиционными минералогическими, а также современными физическими и физико-химическими методами анализа вещества (высокоразрешающей оптической и электронной микроскопией, РЭМ, визуализации изображений, рентгеновской топографии, РВМТ, ИКС, РКФА, ЯГРС, ЯМР, ЭПР, КФА, люминесцентного, термохимического, микрозондового, в т. ч. протонного, рентгеноспектрального, термобарогеохимического и др.) при телесном исследовании индивидов, агрегатов минералов [4, 5] и ПИ в целом. Обработка полученной информации с помощью компьютера для выявления тонких особенностей конституции минералов, а также при детальном изучении минеральных ассоциаций, выявлении закономерностей изменчивости минералов в морфолого-структурном ряду с учетом технологических данных; получение информации о типоморфных признаках и свойствах минералов, определяющих обогатимость рудных и нерудных ПИ. Для каждого вида рудных, нерудных, техногенных ПИ определяется свой комплекс минералогических и других методов минералого-технологической оценки с учетом их генетических особенностей и преобразований при обогащении;

– интеграцию минералогических методов с обогащением ПИ на основе синтеза минералогических знаний и развития различных экспериментальных направлений в технологии с целью повышения системы рудоподготовки и обогащения ПИ в целом (сохранение и преобразование минералого-генетической информации в процес-

се природно-техногенной эволюции минерального вещества, учет при этом двойственной природы свойств минералов, особенно с возможностями их направленного изменения). Оценка обогатимости нерудных ПИ (цеолитовое, гранатосодержащее, карбонатное, фосфатное, глинистое и другие виды МС) на основе комплексирования специфических минералого-аналитических, математических методов и имитационного моделирования [6];

– использование данных по изучению процессов концентрации минералов в природных месторождениях для совершенствования процессов их технологической концентрации путем: а) создания процессов-аналогов; б) термодинамической оценки направления протекания соответствующих процессов с целью сдвига равновесия в определенном направлении для усиления концентрации тех или иных элементов или минералов; в) совместного рассмотрения и совершенствования общей «технологической схемы» концентрации элементов, включая природные и техногенные процессы. Однако, следует иметь ввиду, что геологические процессы существенно отличаются по кинетике их протекания и реакций [6,7]. Тем не менее, ТМ позволяет не только выявить и оценить технологические особенности ПИ и минералов, но и получить обратную информацию для понимания их генезиса;

– выявление на основе геолого-технологической модели при геолого - (минералого) - технологическом картировании месторождения закономерностей изменчивости вещественного, состава текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств типов и сортов рудных и нерудных ПИ на фоне минералого-геохимической зональности рудных тел (толщ), определяющей характер их геохимической и экологической специализации, фазовый состав минеральных ассоциаций и микропарагенезисов основных рудных и нерудных минералов, кристалломорфологию, гранулометрию - особенности технологических схем и показатели обогащения ПИ;

– развитие системы геолого-технологического моделирования МПИ различных генетических типов ПИ на основе совершенствования методов картирования и прогноза их обогатимости; технологической оценки ПИ на ранних стадиях изучения с использованием банков данных (минералогических, геохимических, экологических, технологических), а также априорных методов;

– переход от «сырьевого» использования минералов, от утилизации и эксплуатации минерального мира к применению минералов в составе композиционных материалов [8], с учетом разнообразия нашей минерально-сырьевой базы, к взаимодействию и гармоничному «срастанию» человека с минералами (создание минеральных биокomплементарных систем, имплантантов и т.п.);

– расширение и углубление в связи с ТМ минералогических исследований в области экологической минералогии.

Таким образом, определив важнейшие направления методологии ТМ, можно попытаться понять природу ТС минералов, характер и глубину природно-технологических системных изменений, научиться управлять их формированием. Ведь в конечном итоге технологическая схема строится на основе знаний о минеральном сырье: где, сколько и с какими свойствами имеются минералы (ПИ). Изучение их важно именно в ЕГТС, охватывающей физическое, вещественное и энергетическое пространство, в котором минерал развивается во взаимосвязи со средой (природной геологической и технологической), эволюционируя под действием внешних и внутренних факторов, распадаясь на системы «минерал», два типа «сред» и взаимосвязи между ними. Развивая идеи Н.П. Юшкина [9] о взаимосвязи между минералом и минералогенетической средой, следует считать их во многом общими и в технологической системе. Они подразделяются на: а) *энергетические*, обеспечивающие обмен энергией при структурных преобразованиях индивида, б) *вещественные*, связанные с поступлением вещества из среды в минеральный индивид, обеспечивающее его рост, или, наоборот, разрушение индивида и удаление вещества из минерала в среду; в) *информационные* – передача особенностей структурной организации вещества и энергии от среды к минералу и обратно. Опираясь на данные об особенностях вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов; законы минералогии – информационные, резонанса, инерции [9, 10, 11]; учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии; результаты технологических экспериментов, мы развиваем наши представления о системе природы ТС минералов (рис. 1).

Двойственная природа свойств, их контрастность формируются в динамике ЕГТС на различных дискретных уровнях (макро, микро-, наноуровне) и проявляются широко в природно-технологическом гранулометрическом спектре как на стадии рудоподготовки, так и в различных узлах технологической схемы. Они отражают круговорот вещества в природе на фоне минералого-геохимической и эколого-технологической специализации ПИ. Различия природных и технологических условий локализации информации на различных уровнях минералогической «памяти» связаны с масштабностью размеров, массой, временем, энергией процессов [2, 12]. Причем длительность природных процессов, которые формируют ТС минералов, до установления термодинамического равновесия исчисляется тысячелетиями. Согласно принципу наследования структурных, вещественных и морфологических признаков минералов [13], их ТС потенциально проявляются в различных эволюционных рядах минералов (ассоциаций), отражающих непрерывное направленное развитие процессов минерагенезиса (результат взаимодействия в различных энергетических полях минералов со средой).

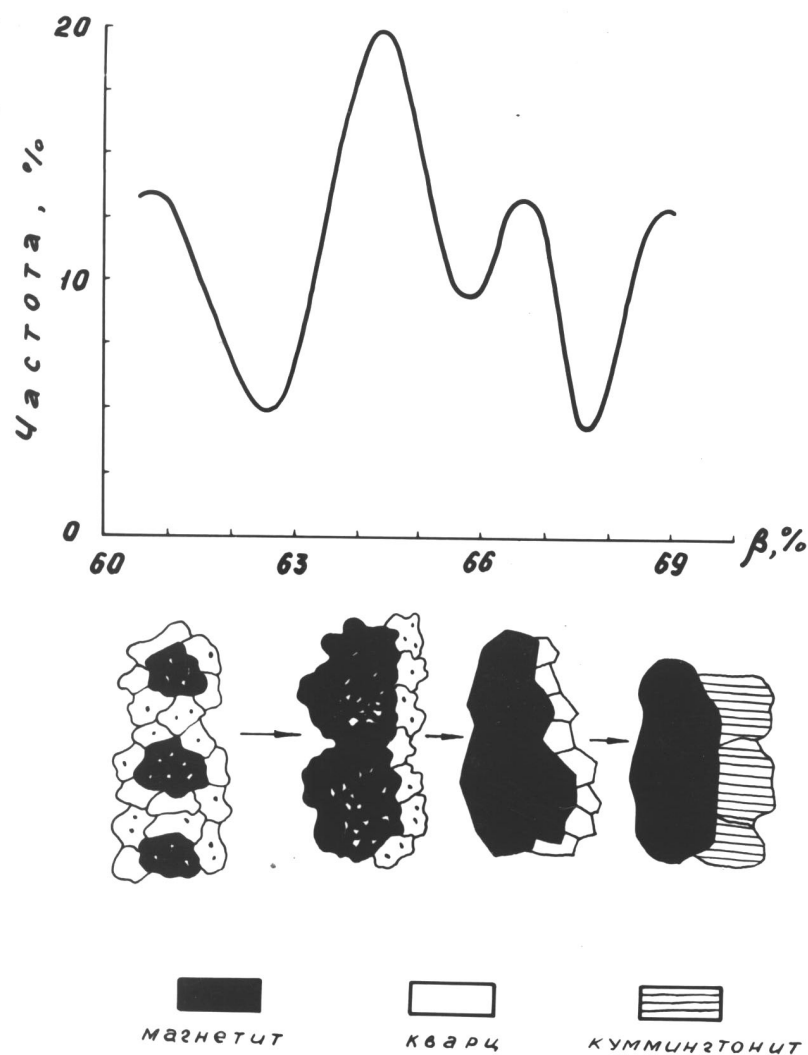


Рис. 1. Зависимость технологических показателей обогащения магнетит-силикатных кварцитов Ингулецкого месторождения (Кривой Рог, Украина) от эволюции типов сростаний минералов, отражающих особенности их геолого-структурной позиции

Этот принцип важно учитывать при переработке и модифицировании минералов (руд); в управлении этими процессами. Однако, быстро текущие технологические процессы, обусловленные производительностью аппаратов, интенсивно разрушая естественную информационную структуру минерала, медленнее передают ее новым продуктам в более или менее сохранившемся виде.

Ведущим фактором при обогащении руд выступает, прежде всего, крупность их измельчения [14], верхний предел которой в начале XX в. составлял 1 мм, в 30-е годы для всех типов руд он был снижен на порядок – до 100 мкм, а в настоящее время многие руды измельчаются до 50 мкм, т.к. существенно ухудшились их текстурно-структурные признаки. Суммарная поверхность измельченной руды при переходе 1мм → 100 мкм крупности возрастает на 2 порядка, а при снижении линейных размеров до 50 мкм она увеличивается уже на 4 порядка (преодолевается качественный барьер). Эти изменения в системе обогащения связаны с вовлечением все большего количества «труднообогащаемых руд» с неблагоприятными характеристиками: тонкозернистые со сложными сростаниями минералов и текстурами, обогащаемые с большим количеством шламов (частицы < 20-10 мкм), не имеющих эффективных методов обогащения. В этих рудах ассоциации минералов имеют близкие ТС и обуславливают низкую их контрастность при сепарации. Например, ассоциации хризоколлы, халькантита, брошантита, полевых шпатов и кварца затрудняют флотуемость окислов и сульфидов ряда Cu-Mo и Cu руд. При тонком измельчении (< 44 мкм) могут значительно изменяться природные признаки ПИ – морфология, гранулометрия и конституция минералов, вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации, псевдоморфизации, полиморфизма [15]. Преобразования минералов при измельчении обычно начинается и заканчивается под воздействием нагрузок (тектонических в природе и механических в измельчительных аппаратах), обуславливая различную степень диспергирования и последующее формирование технологического, вновь образованного, агрегатного состояния вещества (флокулы и др.). При этом по

деформированным участкам, особенно вдоль зон хрупкого разрыва, интенсивнее протекают процессы разложения, окисления и других видов физико-химических преобразований системы минерал – среда, что особенно минералов техногенных МПИ [16]. Все эти особенности ПИ необходимо учитывать при их минералогическом изучении.

Исследуя индивиды и агрегаты рудных минералов, сростаний с другими минералами с учетом конституции, как уже подчеркивалось выше, важно выразить телесно эволюцию их ТС и придать понятию наряду с химическим четкий физический смысл [4], в котором закодированы важнейшие их особенности. Это позволит выразить те или иные особенности неоднородности химического состава и структуры различных порядков в анатомии реальных кристаллов и частиц (зональность, секториальность, мозаичность) в подробностях конституции 2-го и 3-го порядков (полисинтетическое, доменное сложение, эпитаксиальные прослойки); деталях атомного и молекулярного масштаба (разнообразные дефекты кристаллической структуры), в изотопном составе, ядерной, электронной и магнитной структурах. Важно учесть различные по составу включения, поры, трещины, покрытие индивидов и частиц адсорбционным слоем, различные пленки, синтаксию, эпитаксию и др. особенности. При расшифровке анатомии индивидов следует также иметь в виду, что она отражает историю их роста, неоднократную смену габитуса, трансформацию скелетного роста в полногранный и наоборот. Причем она может быть существенно преобразована в процессе изменения и разрушения минералов за счет внешнего энергетического воздействия, как в природе, так и технологии. Важно выявить и проследить особенности изменений, связанные с этапами их син- и эпигенетического метаморфизма [17]. Особое место в оценке ТС минералов и руд принадлежит заключительным этапам минерагенеза, фрагментарно «замораживающих» информацию в морфолого-структурных количественных параметрах (прежде всего, в сростаниях минералов, позволяющих оценивать эффективность их раскрытия при измельчении). Несомненно, один из наиболее эффективных методов познания ТСМ заключен в онтогенетическом подходе [2, 4, 5]. Именно этот подход к оценке технологических особенностей минералов и ПИ, с учетом данных технологического эксперимента, обеспечивает: а) *выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента* с учетом природы сростаний, определяющей гранулометрию, форму зерен сростающихся минералов и особенности их границ; б) *оптимизацию технологического процесса* с учетом контрастности свойств разделения минералов на основе особенностей их конституции - неперменной неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (при комплексном анализе анатомии индивидов и измельченных частиц); в) *выделение при минералогическом картировании типов и сортов ПИ* с получением их всесторонней минералогическо-технологической характеристики.

ТСМ формируются и потенциально наследуются в эволюции морфологии, гранулометрии, конституции природных минеральных ассоциаций на макро-, микро-, наноуровне, преобразуясь при деструктивно-энергетических процессах в различных узлах технологической схемы обогащения ПИ. Исследования эволюции ТС минералов и поведения техногенных фаз позволяют говорить о двух основных механизмах изменений, как это уже подчеркивалось выше, - полиморфном и изоморфном [12]. Наиболее четко оба механизма превращений противопоставляются в техногенезе. При этом полиморфный механизм превращений представляет собой не химические, а симметричные реакции минералов. В случае формирования ТС минералов за счет полиморфных превращений энергия тратится на разупорядочение решетки и структура превращается в низкосимметричную фазу. Авторы подчеркивают - с понижением симметрии возрастают примесная емкость структуры и реакционная активность полиморфных фаз. Исследования обогатимости Fe руд различных генетических типов [18] показали, что преобразования в структуре рудных минералов связаны с морфотропными изменениями в ряду: вюстит $Fm\bar{3}m$ – магнетит $Fd\bar{3}m$ – маггемит $P4_22_12$ – гематит $R\bar{3}c$. В природных и промышленных условиях окислительно-восстановительные процессы перехода магнетита в вюстит или маггемит (далее в гематит) обусловлены объемными изменениями на фоне симметричных преобразований [19]. Так, при окислении магнетита до маггемита объем рудной фазы увеличивается на 9%, при восстановлении до вюстита – уменьшается на 21%, что приводит к большой деформации как отдельных зерен, так и агрегатов. Они провоцируют процессы псевдоморфизации магнетита и гематита (мартитизацию и мушкетовитизацию), которые весьма существенно сказываются на изменении таких ТС преобразованных минералов, как характер и величина удельной поверхности, магнитных (прежде всего, на коэрцитивной силе и др.). Эти процессы в природе усиливаются за счет возникновения многочисленных вторичных микротрещин в минералах. По нашим наблюдениям процессы мушкетовитизации и мартитизации весьма существенно проявлены в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА. Это четко прослеживается в изменении величины полной удельной поверхности магнетитового концентрата и его качества (крупность измельчения 95% класса < 44 мкм) в увязке с зональностью толщи кварцитов - от существенно магнетитовых с силикатами и пиритом лежащего и висячего бока, к силикат-магнетитовым и гематит-магнетитовым центра залежи (1- Fe= 65,8% и уд.п.= 1788 м²/ кг; 2 – 65,3 и 1407; 3 – 66,0 и 1200). На примерах рядов сульфидов и оксидов Дементьева Г.И и Смирнова Ю.М. показывают, что полиморфные модификации существенно различаются по своим физическим свойствам: плотности, твердости, оптическим характеристикам. Это позволяет фиксировать при измельчении руд на ГОКах превращения: магнетит – гематит, сфалерит – вюрцит и др.

Механизм нормального изоморфизма не связан с резким изменением в энергетике структур, предопределяя путь монотонного изменения физических свойств минералов. Нередко в макрокристаллах развит наноблочный изоморфизм [8]. Он образует новый мир структур и морфологически упорядоченных объектов, находящихся в дальнем порядке структурообразующих частиц (механически захваченные в процессе роста наноиндивиды; в виде структур распада твердых растворов; в межзеренных и границах субиндивидов; в агрегатах и надмолекулярной упорядоченности наноструктурах аморфных веществ и др.). Конституция и форма наноиндивидов определяется только внутренними факторами и практически не зависит от внешних воздействий. Этот вид изоморфизма важен при решении проблем полного извлечения полезных компонентов из руд, получения новых видов минерального сырья, при оценке показателей обогащения руд различных генетических типов. Он четко фиксируется комплексом современных методов исследований и в анатомии индивидов. С помощью ИК-спектров поглощения в координатах $\sqrt{3}$ - $1/\sqrt{4}$ нами [20] были выявлены закономерности в проявлении нормального и наноблочного изоморфизма в магнетитах различных генетических типов руд, позволяющие оценивать характер замещения Fe в структуре минерала, фиксировать наноблочный изоморфизм в анатомических срезах и разделять магнетиты по минералого-технологическим сортам руд при картировании. Несомненно, оба явления (изоморфизм и полиморфизм) в значительной степени предопределяют выбор режимов обогащения руд различных генетических типов.

Практика работы ГОКов также показывает, что на эффективность процессов сепарации многих руд может оказывать отрицательное влияние любой минерал (или группа минералов), даже в небольшом количестве, ухудшая показатели обогащения [21, 22, 23]. Например, появление слоистых силикатов (тальк, хлорит, слюды) от десятых долей до первых процентов отрицательно сказывается на флотационных свойствах рудных минералов из скарных W-Мо руд. В Fe-P рудах появление 0,5-1,5% гипса подавляет флотацию апатита и т.д.

Представления о геолого-структурной позиции месторождения позволяют учесть структурно-тектонические факторы в формировании, изменении технологических особенностей ПИ и проследить динамику деформационных проявлений (микроскладчатость, трещиноватость, кливаж, будинаж, брекчирование и др.) на разных уровнях: месторождение – рудное тело – агрегат минералов – индивид в связи с постулатом онтогенеза минералов – физика управляет химией [24]. Именно деструктивно-энергетические преобразования приводят к существенному изменению морфологии и размеров рудных и нерудных минералов, текстурно-структурных признаков и вещественного состава ПИ. Так, проявления упругих, пластических и хрупких деформаций, особенно двух последних, определяют практически все изменения формы и анатомии индивидов минералов (скольжение, двойникование, блокирование, разделение на части, скалывание, истирание), а как следствие – изменение технологических характеристик и показателей обогащения ПИ. Нами [21, 25] показано, что наиболее ощутима роль этого фактора в железистых кварцитах, метаморфизм и метасоматоз которых связан прежде всего с процессами деформации и перекристаллизации. Эти изменения определяются, с одной стороны, физическими свойствами сосуществующих минералов, с другой – особенностями онтогенеза индивидов и агрегатов в связи с проявлением различных видов деформации и повышенной способности к перекристаллизации. Деформации в слоистой текстуре кварцитов проявляются, как правило, дифференцированно: наряду с пластичностью одних слоев подчеркивается хрупкость других. Соотношение динамометаморфизма и рудных проявлений при этом усложняется относительно хорошей растворимостью рудных минералов или их подвижностью. Проявляющийся метасоматоз в связи с дислокациями нередко вызывает сильное искажение не только состава и формы рудных тел, но и появление новых рудных тел, а в конечном итоге существенно влияет на технологические особенности руд. Качество магнетитового концентрата снижается на 1-5%. Детально изучение метаморфической перекристаллизации железистых кварцитов Ингулецкого месторождения в связи с проявлением тектоники - складчатости, брекчирования, образования структур будинаж позволило проследить изменения их технологических свойств (рис. 2). При складкообразовании изменения пластичности слоев кварцитов увязываются с последовательностью их перекристаллизации: кварцевые слои на стадии перекристаллизации кварца более пластичны, чем магнетитовые и куммингтонитовые. Поэтому существенное изменение технологических свойств кварцитов связано с потерей кварцем и магнетитом способности к перекристаллизации, приводящей к их интенсивной грануляции при продолжающейся деформации. В участках развития будинажа кварцевых слоев, связанных с процессами разлинзования и грануляции магнетита, содержание Fe в концентрате уменьшается с 63-66% до 60-63%. Выявленная на месторождении последовательность формирования минералов (пойкилитовый магнетит → роговиковый кварц → ксенобластовый магнетит → идиобластовый магнетит → сотовый кварц → метасоматический куммингтонит) предопределяет генетический тип их сростаний. Это обуславливает корреляционные связи между характером границ сростаний магнетита, двух типов кварца, метасоматического куммингтонита и технологическими свойствами кварцитов, предопределяя колеблемость качества концентрата в пределах одной и той же их разновидности (см. рис. 1). Онтогенетические наблюдения фиксируют формирование того или иного типа сростаний с приуроченностью кварцитов к определенной структурной позиции: а) в участках перекристаллизация проявлена слабо - в значительном количестве сохраняется тонкозернистый, пойкилитовый магнетит, ухудшающий качество концентрата (первый мак-

симум); б) сотовый кварц и метасоматический куммингтонит приурочены к зонам растяжения пластов – замкам складок. Их появление обуславливает границы типа нарастания с магнетитом и, как следствие, ухудшение качества концентрата, дробимости, измельчаемости кварцитов (второй максимум); в) для крыльев складок характерно торможение перекристаллизации, предопределяющей широкое распространение метасоматического типа срастаний ксенобластового магнетита с роговиковым кварцем, что улучшает раскрытие магнетита при измельчении, а значит, и качество концентрата (третий максимум); г) значительное развитие метасоматического куммингтонита вызывает дальнейшее ухудшение дробимости кварцитов – возрастает в целом их вязкость. Одновременно происходит смена границ нарастания (между магнетитом и сотовым кварцем) на «ложные» (между магнетитом и куммингтонитом), что способствует лучшей измельчаемости и раскрываемости магнетита – улучшению качества концентрата (последний максимум).

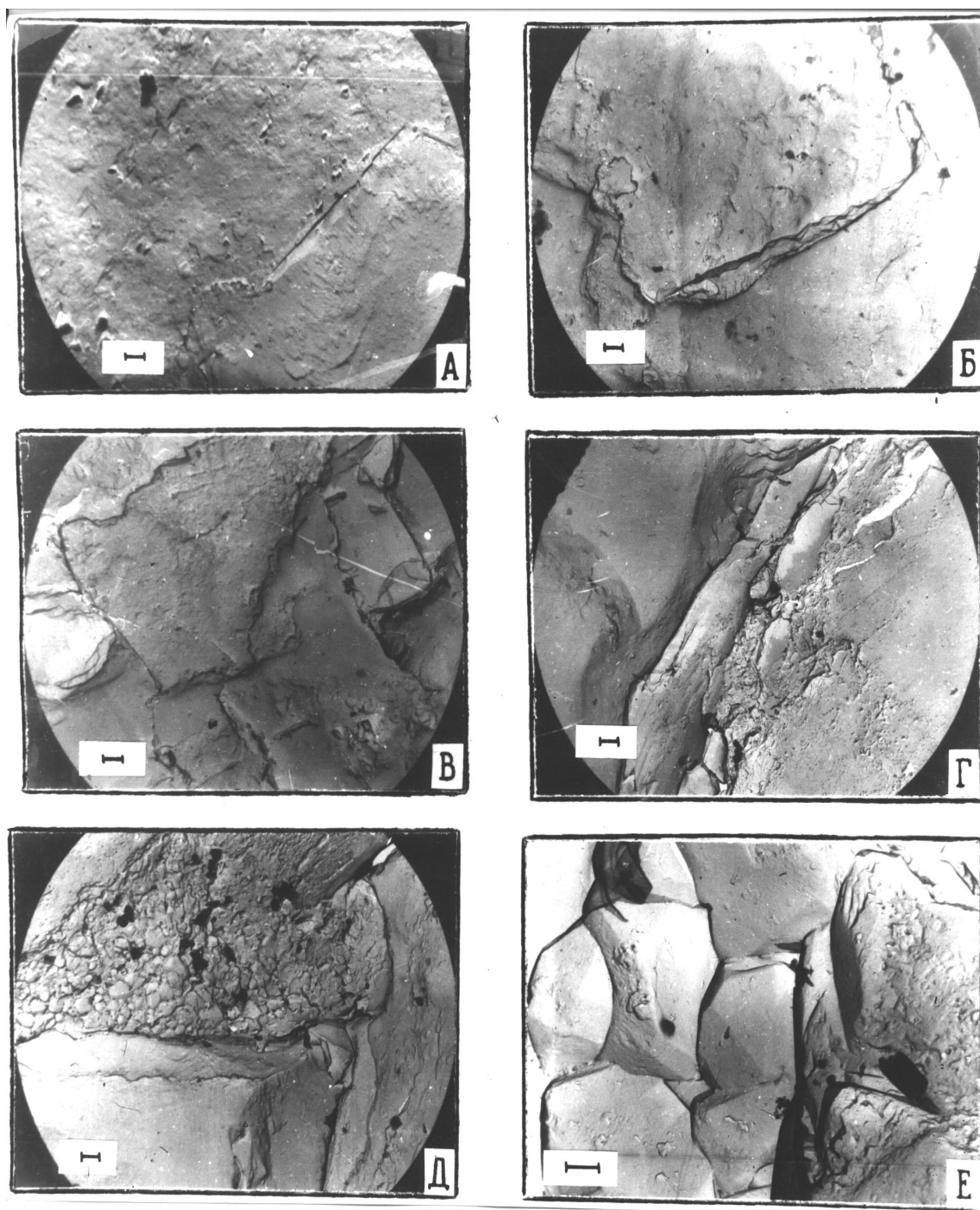


Рис. 2. Последовательные стадии процесса рекристаллизации: от начала разрушения индивида магнетита-1 (А-Г) до появления мелких вторичных индивидов магнетита-3 (Д-Е). Угольные реплики. Масштаб – 10 мкм

Наблюдения в сложноскладчатых железистых кварцитах Михайловского месторождения [21] показали также изменения минералогических (анатомии индивидов магнетита) и технологических характеристик в зависимости от микроскладчатости и кливажа. Кливаж разлома и скольжения связан с серией кулисных микроскладок и серией мелких асимметричных складок с некоторыми элементами их проволочивания, с развитием в отдельных участках зон милонитизации. Все это существенно влияет на развитие процесса рекристаллизации магнетита (рис.) и появление значительного количества тонких микроблочковых выделений размером менее 30 мкм. Между количеством частиц минерала такого размера и содержанием Fe в концентрате выявляется четкая обратная связь ($r = -0,80$).

В минералого-технологической классификации кварцитов для каждого технологического сорта на месторождении учитывается этот параметр, как при картировании, подаче руд на обогащательную фабрику (ОФ), так и при минералогическом контроле их обогащения.

Таким образом, при оценке обогатимости железистых кварцитов и геолого-технологическом картировании необходимо учитывать взаимосвязь их технологических свойств с характером структурно-тектонических проявлений их на месторождении, которые в значительной степени предопределяют закономерности пространственной изменчивости и, как следствие, закономерности изменчивости вещественного состава и технологических показателей обогащения.

Типоморфные свойства минералов (в т.ч. технологические) выявляются в сочетании онтогенетических исследований с комплексом современных методов изучения вещества и технологическим экспериментом, предопределяя выбор схемы и глубину обогащения ПИ. На их основе оцениваются ведущие геолого-структурные и минералого-технологические факторы, определяющие обогатимость ПИ. Они связаны с восстановлением минерогенеза любого объекта – отдельного минерального вида (даже отдельных его конституционных или анатомических элементов) до минеральных агрегатов, парагенезисов, ассоциаций, комплексов на уровне минералогической «памяти», отражающего свою генетическую историю в эволюционных структурных, морфологических, видовых, формационных и т. п. рядах. Здесь используется информация, записанная в каменной форме [13, 24]. Ведь зарождаясь, разрастаясь, изменяясь (при совместном действии параметров среды - Р, Т, С, Eh-pH и др.), минералы фиксируют на себе в виде зонального строения, реакционных каемок, псевдоморфоз, структур распада, нарастаний одних кристаллов на другие, прочих особенностей – начало, эволюцию и остановку действия факторов, отражая, таким образом, в каменной записи динамику причин минерогенеза и техногенеза. Поэтому их следует рассматривать не только как «куски пространства», но и «окаменевшие отрезки времени». Важную роль при этом играют факторы структурного, вещественного, морфологического наследования, проявленные в определенных энергетических условиях. ТС минералов формируются в ЕГТС и имеют двоякую природу - инерционно и в соответствии с принципом детерминизма наследуют природные особенности вещественного состава, текстурно-структурные признаки, физические и физико-химические свойства ПИ различных генетических типов месторождений, изменяемые в техногенезе. Например, в железных рудах различных генетических типов месторождений магнетит характеризуется следующими типоморфными признаками, определяющими их обогатимость [21]:

– **гетерогенностью состава**, обусловленного генезисом минерала и связанного с проявлениями нормального и аномального – наноблочного изоморфизма, предопределяющего теоретически возможное и технологически достижимое качество магнетитового концентрата. Характер неоднородности и содержание Fe в минерале (ср. данные) изменяется в ряду: 71,9% (собственно магнетиты и оксимагнетиты в железистых кварцитах Кривого Рога и КМА) → 69,3% (Mn-магнетиты в карбонатных скарнах Дашкесана) → 68,4% (Ti, Mg, Al-магнетиты в карбонат-силикатных скарнах Соколовки и Сарбая) → 65,4% (Ca, Mg, Al – магнетиты в пирокластических породах, связанных с траппами Коршуновского и Рудногорского месторождений) → 64,7% (Al, Mg, Ti – магнетиты в ультраосновных щелочных породах с карбонатами Ковдора) → 63,7% (Ti – магнетиты и Ti – магнетиты с ильменитом в ультраосновных и основных породах Качканарского и Кусинского месторождений). Следовательно, наиболее чистые магнетиты метаморфического типа и самые низкие по содержанию Fe магматические. **Метаморфизм минералов любого генезиса, как заключительный этап минералообразования вызывает изменение его состава и свойств, как в природе, так и в техногенезе.** Изучение анатомии индивидов позволяет четко проследить эволюцию метаморфических преобразований минерала [17]: последовательное изменение вплоть до разрушения первичных структур зонального, зонально-секториального, микроблочного строения, связанного с явлениями перекристаллизации, рекристаллизации и т.п. см. рис. 3), приводящие в итоге к изменению уровня гетерогенности состава и строения частиц магнетита в классах различной крупности. В технологической схеме при измельчении за счет явлений метаморфизма минерала нарушается его первичная доменная структура, что вызывает существенный рост коэрцитивной силы (к.с.) частиц. По данным Дина и Дэвиса (1940), к.с. намагниченных частиц магнетита резко возрастает с уменьшением их размера в интервале 40-20 мкм. Это обуславливает повышенную флокулируемость их и захват крупных частиц нерудных минералов, разубоживающих концентрат (на 1-3% по Fe). Повышение качества концентрата возможно за счет стадий перемывки при размагничивании исходной пульпы в магнитных гидроциклонах. В то же время резко падает удельная магнитная восприимчивость частиц минерала размером менее 20

мкм, обуславливая их потери в хвостах (обычно их содержание в хвостах составляет 15-30% от общего содержания магнетита);

-- изменчивостью магнитных свойств (в т.ч. характера магнитных доменов) в связи с генезисом руд, **определяющих эффективность сепарации (изменение содержания Fe в концентрате и потери его в хвостах)**. Особенности изоморфизма элементов предопределяют параметры кристаллической структуры минерала, прежде всего параметры его решетки, и в итоге типоморфизм магнитных свойств. По величине удельной магнитной восприимчивости изученные магнетиты подразделяются на 3 группы: 1 – $(75000-100000) \cdot 4 \pi / 10^3$ м³/кг (железистые кварциты); 2 – $(53000-77000) \cdot 4 \pi / 10^3$ м³/кг (магнетиты в карбонат-силикатных скарнах и карбонатах); 3 – $(60000-95000) \cdot 4 \pi / 10^3$ м³/кг (магнетиты карбонатных скарнов). Важны также данные, как уже подчеркивалось выше, по изменению к.с. минерала, которая изменяется в тех пределах: 1) наиболее высокие – $(120-470) \cdot 10^3 / 4 \pi$ А/м – характерны для магнетитов щелочного (железистые кварциты СевГОКа, Кривой Рог) и карбонатного (Дашкесан, Ковдор) метасоматоза; 2) к.с. магнетитов железистых кварцитов без существенного метасоматоза колеблется в пределах $(40-150) \cdot 10^3 / 4 \pi$ А/м, а за счет процессов щелочного и карбонатного метасоматоза она возрастает до $350-400) \cdot 10^3 / 4 \pi$ А/м; 3) специфическое тонкоблочное строение магнетитов Соколовского и Сарбайского месторождений (исключая шестоватую разновидность) обуславливает низкие значения – $150-40) \cdot 10^3 / 4 \pi$ А/м. **Высокую минерало-технологическую информативность несут в себе коэрцитивные спектры и данные термомангнитных анализов, позволяющие также оценивать гетерогенность состава и структуры магнетитов различного генезиса**, что рассмотрено нами детально [21]. Интересны также данные по типоморфизму ТЭДС магнетитов (точкам Кюри, информацией по анализу кривых нагревания и охлаждения, связей их с изменением кристаллической структуры, стадийностью минералообразования, обеспечивающих определенные по содержанию Fe концентраты в основных минерало-технологических типах сортов, как показано нами по Ковдору:

-- эволюции морфологии (в т.ч. анатомии), гранулометрии и типов сростаний магнетита с рудными и нерудными минералами, как фактора оценки значимости текстурно-структурных признаков руд и особенностей раскрываемости минералов при дроблении и измельчении, влияющих на эффективность сепарации минеральных частиц. Изучение особенностей онтогении магнетита нередко выявляет сложное внутреннее строение кристаллов и агрегатов, проявление зонального, секториального, мозаично-блокового строения, следов роста и растворения на гранях кристаллов, характер деформационных изменений. Колебания физико-химической обстановки приводит к неоднократной смене габитуса минерала, что может быть выражено общей формулой:

$$\begin{array}{ccccc} \{111\} & & \{111\} & & \{111\} \\ > \{111\} - \{110\} < & & > \{111\} - \{100\} < \\ \{110\} & & \{110\} & & \{110\} \end{array}$$

Как правило, в пределах одного и того же месторождения магнетит встречается в виде нескольких генераций: это зернистые различного облика и крупности индивиды, псевдоморфозы; сплошные, ленточные, пойкитовые за счет включений других минералов, мирмекитовые и мирмекитоподобные, радиально-лучистые агрегаты, параллельные сростки, сложные эпитаксисческие нарастания слюды, хлоритов на магнетит и т.д. При измельчении кристаллы минерала раскалываются по определенным кристаллографическим плоскостям и фиксируются в широком технологическом гранулометрическом спектре различных классов крупности (со своей кристаллохимией и способностью поверхности адсорбировать как определенные химические элементы и группы, так и переизмельченные частицы других минералов, затрудняющих их сепарацию, в частности, при флотации). Очень важно выявить природу границ типов сростаний магнетита с гематитом, сульфидами, нерудными минералами, как это рассмотрено нами выше при анализе минерало-технологических данных рис. 2.

В оценке типоморфных признаков минералов комплексных руд при обогащении важно комплексно сочетать их природные и технологические характеристики - в рудах Ковдора это сделано нами как для магнетита, так и попутно извлекаемых бадделеита и апатита [21, 25]. Следует также заметить, что сегодня для многих типов рудных и нерудных ПИ исследованы типоморфные признаки минералов и минеральных ассоциаций, обеспечившие разработку высокоэффективных технологических схем [23, 26, 27, 28].

ТС минералов в Природе и Технологии основные методы направленного их изменения связаны с «регенерированием» или «залечиванием» дефектов кристаллической решетки на поверхности или в объеме измельченных частиц. К ним относятся: *механические* (особые режимы и приемы измельчения), *акустические* (ультразвуковая обработка), *термические* (нагревание и последующее быстрое или медленное охлаждение), *активация свойств поверхности* (блокировка поверхностных центров в физических полях простыми молекулами газовой составляющей; изменение соотношения электронных и дырочных центров различными методами смещения адсорбционно-десорбционного равновесия, что изменяет условия сепарации частиц как за счет поверхностных, так и объемных изменений [29], *химические изменения* (протравливание, обработка реагентами, «легирующими» поверхность примесными ионами), *радиационные* (облучение рентгеновскими и гамма-лучами, потоками быстрых частиц) т.п.

При направленном изменении свойств минералов на макро-, микро- и наноуровне возможно воздействовать как на сам минерал, так и среду. При различных видах энергетического воздействия с учетом типоморфных особенностей ПИ возможно направленно преобразовать их ТС, выбрать оптимальный способ модификации, изменив целенаправленно контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения [30]. Разработка и внедрение методов селективного выделения минералов связано с использованием новых систем рудоподготовки и обогащения ПИ. Гараниным К. В. (2003) впервые предложены и обоснованы элементы новой технологии электроимпульсной дезинтеграции для селективного раскрытия щелочно-ультраосновных пород; в т.ч. и с целью обеспечения высокой степени сохранности алмаза и минералов-спутников при их извлечении и возможности извлечения микрокристаллов. С помощью применения метода электроимпульсного дробления были выделены и изучены микроалмазы из автолитовой брекчии (считавшейся неалмазоносной) трубки им. В. Гриба Архангельской алмазоносной провинции. Несомненно, предложенная технология может быть использована в качестве отдельного завершённого цикла дезинтеграции пород и руд, а также как звено в технологической цепи аппаратов.

Разработаны новые технологии извлечения тонкого золота на основе нанотехнологий [31]. Б. А. Остащенко показана, в отличие от традиционного технологического подхода, возможность создания поверхностного заряда у минералов, сопутствующих Au в концентрате, что послужило основой для разработки способа его термоэлектрической сепарации. В процессе эксперимента выяснилось, что равновесие на поверхности минерала, обусловленное адсорбцией OH^-H^+ , O^- , CO^- , C^- , можно сдвинуть в ту или иную сторону самыми различными способами, в т.ч. нагреванием, облучением и др. Масспектроскопические и манометрические исследования выявили, что поверхность минералов шлиха (концентрата) в обычных условиях покрыта ионами OH^- . В результате нагревания они уходят с поверхности силикатов при 220°C и оксидов при 400°C . Т.к. OH^- -группы имеют отрицательный заряд, то с их удалением поверхность минеральной частицы становится заряженной положительно. При этом на поверхности образуется нескомпенсированный заряд Q_s . У золота и алмаза при этой температуре величина заряда близка к нулю. Извлечению частиц минерала размером 1-5 мкм мелких и тонких классов концентрата в экспериментах составило 99-100%. Б.А. Остащенко разработана также технологическая схема гравитационного обогащения Au класса $-200+40$ мкм. Использование при этом метода «изометризации» пластинчатого Au (с образованием валиков по краям золотин и формированием тороидальных частиц) позволило повысить его извлекаемость в концентрат на 25%. Ему же удалось повысить качество лейкоксенового концентрата с 50-52% до 80,82% TiO_2 без изменения основных режимов и оборудования за счет изменения магнитной восприимчивости минерала при ультразвуковом облучении.

Микроминералогия выделений порядка 100-0,1 мкм является сегодня новым высоко эффективным направлением в изучении, оценке и обогащении тонкодисперсных руд (минералого-геохимических систем) благородных, редких и др. металлов, промышленную ценность которых составляют элементы с низкой концентрацией (0,000n-0,0n %). Методология микроминералогического подхода при изучении руд Au-Ag месторождений (на примере золоторудных месторождений вулканогенных областей Чаткальско-Кураминского региона Восточного Узбекистана) позволила уточнить физико-химические особенности их образования, элементы зональности, уровни эрозионного среза и т. д. скрытого Au оруденения и разработать технологию их обогащения. В результате наноминералогических исследований установлены закономерности формирования минералов и минеральных фаз в нетрадиционных месторождениях (Чудное, Полярный Урал) редкоземельно-редкометалльно-золотого типа. Новые данные об особенностях минерального состава руд позволяют выбирать наиболее оптимальную методику для определения в рудах истинного содержания благородных металлов и на этой основе разрабатывать рациональную технологию обогащения. Предложенная технология автоклавного кислотного разложения слюдяного концентрата, хотя пока и дорогая, но обеспечивает 100% извлечение Au. Высокое содержание Au в рудах подобного типа, представленного микро- и нанофазами, пространственно связанных со слюдами, несомненно, требует разработки специальных технологий их обогащения. В результате экспериментальных работ в Институте геологии Коми разработана методика искусственного облагораживания исходных бесцветных пренитов из базальтов Северного Тимана. Применение разработанного способа (облучение и отжиг) позволяет повысить выход ювелирного сырья с 3-5% до 60%, агата – до 70%. Создана модель природной окраски пренита, позволяющая описывать все многообразие цветовой гаммы минерала из разных месторождений и прогнозировать возможного такого облагораживания исходного сырья.

Эволюция ТСМ, связанная с пространственно-временными закономерностями распределения минералов типов и сортов ПИ, прослеживается при геолого-технологическом картировании на основе геолого-технологической модели месторождения. С помощью такой модели, как показывают наши исследования по бадделит-апатит-магнетитовым рудам Ковдора [18], можно управлять технологией процесса обогащения с учетом рационального и комплексного использования ПИ. Модель строится на системе ретроспективного комплексного минералогического исследования и экспериментальных технологических данных. В ее основу положены следующие принципы:

- все минералы – продукт единых, взаимосвязанных процессов, поэтому их изучение проводится комплексно, с учетом основных минеральных ассоциаций;
- различаются на разных уровнях: месторождение (зональность) – руда (рудное тело) – минерал (агрегат – индивид);
- пространственное распределение парагенетических ассоциаций, контролируемых структурными факторами;
- онтогенический подход к минералого-технологической оценке руд, позволяющий: установить последовательность выделения и характер взаимоотношения минералов, исследовать закономерности развития процессов минералообразования, а в конечном итоге оценить эффективность раскрытия минералов при обогащении и охарактеризовать контрастность их технологических свойств;
- типоморфные минералого-генетические факторы, определяющие обогатимость, являются основными критериями ГТК;
- при рудоподготовке и обогащении природно-обусловленные технологические свойства минералов (руд) нередко существенно изменяются (не все в одинаковой степени), поэтому, проникая в суть закономерностей, формирующих технологические свойства руд и связь их с конституцией минералов, очень важно придать последней четкий физический смысл.

Сложная и многостадийная генетическая природа руд, а также существенное изменение свойств при рудоподготовке и обогащении обусловили в целом различия между минералого-технологическими сортами 3-х главных компонентов (магнетита, апатита, бадделеита), что осложняет усреднение их, технологический прогноз и систему контроля за процессами рудоподготовки и обогащения. Внедрение ЭВМ (алгоритм геолого-технологического моделирования месторождения) обеспечивает объединение геолого-технологических планов в единую модель с привлечением дополнительных характеристик руды: содержаний Fe, P_2O_5 , S и др. Геолого-технологические планы по каждому из видов сырья в совокупности со вспомогательной информацией по руде составляют важнейший информационный модуль (базу данных), по которому ЭВМ строит образ цифровой модели месторождения. Остальные модули и блоки носят вспомогательный, обслуживающий характер на основе расчетных показателей. Так, *модуль прогноза и управления технологическими процессами* обеспечивает расчет соотношения технологических сортов руд с учетом промышленно-важных компонентов для усреднения руды в цикле карьер – усреднительный склад – усреднение на обогатительной фабрике (ОФ) с целью достижения рационального режима технологического оборудования и стабилизации показателей переработки. *Модуль контроля за процессами рудоподготовки и обогащения* позволяет фиксировать и корректировать нарушения технологического процесса, вызванные объективными (изменение природных условий, износ оборудования, переход на новые реагенты и пр.) и субъективными факторами (нарушение технологических режимов, несоблюдение направлений добычных работ и пр.). *Модуль решения геологических задач* обеспечивает автоматизированное выполнение рутинной работы: подсчет запасов, построение погоризонтных геолого-маркшейдерских планов, ведение геологической документации и т. д. Вся цифровая расчетная информация проходит через блок оценки ее достоверности, что позволяет оператору оценить ее значимость и ввести необходимые коррективы.

Сегодня результаты ГТК месторождений используются для решения широкого круга задач: рационализации работы горных, геологических и технологических служб ГОКов в связи с усреднением руд перед подачей на ОФ, оценки сырьевой базы комбината (в том числе комплексности), разработки автоматизированных систем управления производством (АСУП). На основе последней с помощью ГТК можно проводить разные виды оперативного и перспективного планирования, контролировать работу комбинатов. Это требует постоянного совершенствования системы ГТК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивец В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых. // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва, 1982, вып. 4. - С. 4-20.
2. Пирогов Б.И. Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов. // Проблемы онтогении минералов. Л.: Наука, 1985. - С.22-30
3. Турсебеков А.Х., Конев Р.И., Каширский С.А., Ахмедов А.М. Дискретное состояние вещества в рудных и техногенных системах. // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. - С.174-175.
4. Григорьев Д.П. Позиции онтогении минералов. // ЗВМО, 1978, ч. 107, в. 4. - С. 407-415.
5. Григорьев Д.П. Рассуждения о минералогии. Сыктывкар: Геопринт, 1998. - 88с.
6. Землянский В.Н. Развитие технологических основ комплексной утилизации Al-, Ti- и Fe силикатных горнопромышленных и техногенных отходов (на примере бокситовых и титановых руд Северо-Онежской и Тиманской минералогических провинций Восточно-Европейской платформы. // Автореф. докт. дис. Ухта : Изд. УГТУ. 2005. - 43 с.
7. Барский Л.А. Основы минералургии. Теория и технология разделения минералов. М.: Наука. 1984.- 470 с.
8. Юшкин Н.П. Наноминералогия: объекты, функции, перспективы. // Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI века. СПб.: Мин. об-во при РАН, 1999. - с. 20.

9. Юшкин Н.П. Теория и методы минералогии. Л.: 1977. - 291 с.
10. Юшкин Н.П. Теоретические и методические основы расшифровки генетической информации, содержащейся в минералах. // Новые идеи в генетич. минералог. Л.: Наука, 1983. - С. 38-47.
11. Григорьев Д.П. Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания. // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. Киев: Наукова Думка, 1988. - С. 11-15.
12. Деметьева Г.И., Смирнов Ю.М. Изоморфные и полиморфные превращения минералов в техногенезе. // Обогащение руд, № 3. 1988. - С. 34-37.
13. Юшкин Н.П., Хомяков А.П., Евзикова Н.З. Принцип наследования в минералогенезисе. Сыктывкар: Препринт. 1984, в. 93. - 32 с
14. Ревнищев В.И. Рудоподготовка как новое направление горных наук. // Основные направления развития техники и технологии обогащения ПИ. Л., 1983. - С. 3-22.
15. Пирогов Б.И. Роль минералогических исследований в обогащении руд. // Минерал. журн. 1982, № 1. - С. 81-92.
16. Юргенсон Г.А. Проблемы минералогии геотехногенеза. // Роль минералог. исслед в решении эколог. проблем (теория, практика, перспективы развития). СПб.: Мин. об-во при РАН, 2002. - С. 200-203.
17. Руденко С.А., Иванов М.А., Романов В.А. Метаморфизм минералов – важное явление в истории их формирования. // ЗВМО, 1978, № 6. - С. 698-710
18. Пирогов Б.И. Теоретические основы технологической минералогии. // Теория минералогии. Л.: Наука, 1988. - С.127-134.
19. Дымкин А.М., Пермиков А.А. Онтогенез магнетита. Свердловск: УНЦ АН СССР. 1984. - 188 с.
20. Пирогов Б.И., Холошин И.В. Геолого-технологическое моделирование комплексных железорудных месторождений. // Геолого-технологическое моделирование рудных месторождений. СПб.: А/О «Механобр-Техника», 1993. - С. 83-95.
21. Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988. - 304 с.
22. Попов В.А. О необходимости усиления минералогических исследований в технологии минерального сырья // Онтогенез минералов и технологическая минералогия. Киев: Наукова Думка, 1988. - С. 16-21.
23. Изюитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. - 582 с
24. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогенез минералов. М., 1975. - 340 с.
25. Пирогов Б.И., Холошин И.В. Инфракрасные спектры поглощения магнетита и их прикладное значение. // Минерал. журн. 1989, № 2. - С. 73-80.
26. Лыгина Т.З. Методические основы комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых. // Автореф. докт. дис. М: ВИМС. 2001. - 50 с
27. Ожогина Е.Г. Технологическая минералогия труднообогатимых марганцевых руд России. // Автореф. докт. дис. М: ВИМС. 2002. - 50 с
28. Щипцов В.В. Геолого-минералогические основы технологической оценки промышленных минералов Карелии. // Автореф. докт. дис. СПб.: РИЦ СПГГИ. 2000.- 46 с.
29. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. - 194 с.
30. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. // Пласкинские чтения. М.: Альтекс, 2003. – 145 с.
31. Остащенко Б. А. Направленное изменение технологических свойств минералов. // Автореф. докт. дис. Сыктывкар: ИГ Коми науч. Центра УрО РАН. 1998. - 43 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.

ВНИИ минерального сырья им. Н.М.Федоровского, г. Москва,
e-mail vims-ozhogina@mail.ru

Одной из основных проблем недропользования в настоящее время является ухудшение воспроизводства минерально-сырьевой базы, в том числе – черных, цветных, легирующих металлов, многих видов нерудного сырья. Медленное и трудное вовлечение месторождений в освоение, и даже при этом – рост дисбаланса между добычей и приростом запасов представляют серьезную проблему для развития потенциала металлургической, химической и других ключевых отраслей промышленности. Отечественная минерально-сырьевая база по многим дефицитным полезным ископаемым представлена низкокачественным труднообогатимым сырьем, сосредоточенным в месторождениях с неблагоприятными для освоения географо-экономическими и горно-техническими условиями. Промышленное освоение месторождений зачастую связано со значительными потерями главных и особенно сопутствующих полезных компонентов, большим объемом вскрышных работ и, следовательно, негативным влиянием на окружающую среду. В

переработку вынужденно вовлекаются труднообогатимые, некондиционные виды сырья, отличающиеся полиминеральным составом, сложным текстурно-структурным рисунком, высокой дисперсностью, гетерогенностью промышленно ценных минералов, близостью физических свойств рудных и породообразующих фаз. Традиционные технологии обогащения нередко либо не в состоянии обеспечить рентабельность освоения месторождений, либо не отвечают жестким требованиям экологической безопасности. Поэтому перспективы развития отечественного минерально-сырьевого комплекса следует связывать, главным образом, с созданием и применением новых конкурентоспособных эффективных безотходных и малоотходных технологий добычи и переработки полезных ископаемых, обеспечивающих комплексное извлечение полезных компонентов (как главных, так и сопутствующих), замкнутый технологический цикл, утилизацию отходов и рекультивацию земель. Внедрение таких прорывных технологий позволит повысить потребительскую стоимость минерального сырья и продуктов его переработки за счет снижения затрат на их производство и повышения качества.

Реализация инновационно-технологического подхода к развитию, воспроизводству и рациональному использованию минерально-сырьевого комплекса должна проводиться по двум направлениям:

1) переоценка известных месторождений на основе современных горно-геологических, технологических, экономических решений по освоению, при этом переоценке могут подлежать не только резервные и забалансовые, но и балансовые месторождения, оцененные на уже устаревших основах (огромные запасы бедных руд с нерациональной технологией переработки);

2) поиски и оценка новых сырьевых объектов с более привлекательными технико-экономическими показателями. Ключевым компонентом эффективного развития работ по обоим направлениям являются исследования технологических свойств (технологическая оценка) минерального сырья, которые необходимо проводить с учетом использования современных достижений науки, техники, технологий. Технологическая оценка позволяет определить промышленную ценность полезных ископаемых, т.е. экономически обоснованную целесообразность вовлечения их в переработку на современном этапе развития технологий, способы и методы его передела, контролировать эффективность перерабатывающего производства и управления им, предопределять экологические последствия производств и природовосстановительные мероприятия. При этом, как показывает опыт работы последнего десятилетия, в современных условиях особенно возрастает роль экспрессной технологической оценки минерального сырья на разных стадиях ГРП, позволяющей прогнозировать его обогатимость, а также конечные характеристики химико-металлургической переработки продуктов обогащения с получением прогнозных количественных технологических показателей.

Решение задач технологической оценки минерального сырья в настоящее время осуществляется в основном методами технологической минералогии. Технологическая минералогия, являясь самостоятельным направлением прикладной минералогии, объединяет все виды минералогических исследований, связанных с изучением зависимости технологических свойств минералов от их состава и строения, поведения минералов в технологических процессах, направленного изменения свойств минералов с целью их разделения и обогащения.

Целью современной технологической минералогии является создание научных и методических предпосылок решения проблемы рационального освоения минерального сырья, максимально возможного извлечения и комплексного использования всех минералов (как главных, так и сопутствующих), расширение и укрепление отечественной минерально-сырьевой базы.

В последние годы наблюдается интенсивное развитие технологической минералогии различных видов полезных ископаемых, что определяется объективными причинами. Совершенно очевидно, что прогрессирующее ухудшение качества перерабатываемых руд, увеличение доли труднообогатимых объектов и вовлечение в переработку новых видов сырья, ранее не изучавшихся, оптимизация технологий передела и повышение экономической эффективности комплексного использования сырья сегодня невозможны без прикладных минералогических исследований.

Современный комплекс минералого-аналитических методов (высокоразрешающая оптическая и электронная микроскопия, рентгенография, рентгенотомография, люминесценция, инфракрасная и мессбауэровская спектроскопия, магнитометрия, микрорентгеноспектральный, термический и элементный анализы), обеспеченный соответствующей нормативно-методической документацией, стандартными образцами состава (СОС) и фазового состава и свойств минералов (СОФС), позволяет получать полную и всестороннюю информацию о минеральном объекте.

Особенности современных, как правило, полиминеральных комплексных руд, в том числе и техногенного генезиса, обусловленные геологическими (магматическим, тектоническим, литологическим и др.) и минералогическими (текстурно-структурные признаки, минеральный состав и пр.) факторами, определяют подход к их изучению, выбор рационального комплекса методов исследования и последовательность их применения. Следует отметить, что при решении конкретных задач, а также применительно к конкретным видам полезных ископаемых и технологическим схемам добычи и переработки используются свои комплексы методов и методик анализа элементного и минерального состава, строения и свойств объектов.

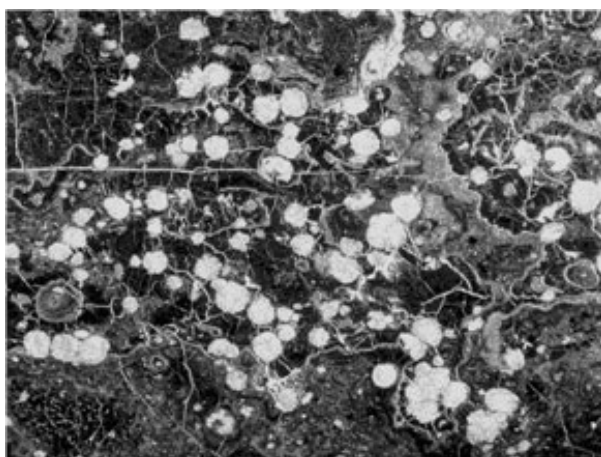
Рациональное комплексирование методов технологической минералогии позволяет определять минеральный состав исходного сырья, его структурных характеристик (размерности полезных минералов руды и характера их сростаний с другими минеральными фазами), описывать текстурные особенности руды (взаимную ориентировку минеральных агрегатов), изучать особенности распределения извлекаемых элементов по минералам руды, определять свойства минералов, влияющие на процессы обогащения.

В настоящее время во Всероссийском институте минерального сырья им. Н.М.Федоровского (ВИМС) ведутся работы по созданию эффективных технологий переработки руд черных, легирующих, цветных, редких и благородных металлов, а также нерудных полезных ископаемых. Прикладные минералогические исследования являются неотъемлемой частью этих работ. С одной стороны, минералого-аналитические исследования позволяют с высокой степенью достоверности проводить технологическую оценку исходного минерального сырья. С другой, обеспечивают минералого-аналитическое сопровождение разрабатываемых технологий переработки полезных ископаемых, в том числе контроль за ходом обогатительных процессов путем экспрессного фазового анализа продуктов обогащения.

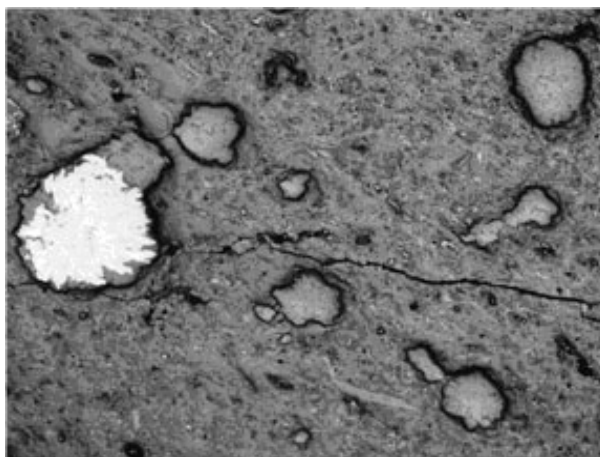
Ниже остановимся на примерах использования прикладных минералогических исследований при технологической оценке различных видов полезных ископаемых.

На современном этапе возросли экологические требования к качеству используемых в промышленности углей. В связи с этим появилась потребность в их высококачественном обогащении, предусматривающем, в первую очередь, обеззоливание и обессеривание. Исследование углей ряда месторождений России комплексом минералого-аналитических методов (оптическая микроскопия, рентгенография и рентгеномография) с целью оценки их качества и технологических свойств позволило выявить характер распределения порообразующих минералов, отвечающих за зольность, идентифицировать и количественно оценить серосодержащие фазы, определить гранулометрические и морфометрические характеристики этих минералов.

Так энергетические угли Хакасского месторождения (Минусинский бассейн) по степени отражения витринита принадлежат к переходной стадии углефикации между бурыми и каменными углями. Отражение 0,36-0,42% соответствует высшей степени метаморфизма бурых углей, переходной к каменным (стадия БД). Минеральные фазы представлены в углях слоистыми алюмосиликатами (метагаллуазитом, каолинитом, с незначительной примесью хлорита и иллита), кварцем, карбонатами и сульфидами железа (в переменных количествах). Глинистые и карбонатные минералы приурочены большей частью к основной массе угля, сложенной микрокомпонентами групп витринита, экзинита и инертита. Карбонаты представлены сидеритом, который является сингенетичным минералом и присутствует в виде оолитов и конкреций радиально-лучистого строения (рис.1а). Содержание конкреций сидерита в угле не превышает 10% их средний размер 106 мкм, максимальный – 657 мкм, средний массовый – 300 мкм. Сидерит иногда замещается марказитом (рис.1б). Характер замещения различный: от тонких корочек на поверхности конкреций до почти полных псевдоморфоз. Количество марказита в угле 0,8%; средний размер зерен составляет 63 мкм, максимальный -597 мкм, средний массовый -434 мкм.



а



б

Рис. 1. а) Оолиты сидерита в клареновом угле. Проходящий свет, николи -. б) псевдоморфоза марказита по сидериту (белое) в однородном дюреновом угле. Отраженный свет, николи -.

Из вышеизложенного следует, что уголь Хакасского месторождения является энергетическим каменным углем высокого качества. Судя по среднему массовому размеру марказита, начальная крупность его дробления с целью извлечения сульфидов должна быть 0,5 мм. Учитывая низкое содержание и относительно

хорошее раскрытие марказита, по-видимому, не следует проводить специальных операций по обессериванию угля, за исключением дробления. Содержание порообразующих минералов в целом в углях невысокое, и от большей части этих минералов, в частности, сидерита можно избавиться в процессе дробления при крупности менее 0,3 мм.

Перспективы развития отечественной минерально-сырьевой марганцеворудной базы в первую очередь сегодня связаны с созданием эффективных технологий переработки низкокачественных и труднообогатимых руд, к числу которых относятся руды Усинского месторождения (Кемеровская область).

Родохрозитовые руды Усинского месторождения характеризуются сложными текстурно-структурными соотношениями слагающих их минеральных агрегатов и пространственным совмещением разновременных минеральных ассоциаций и генераций рудных минералов.

Минералогическими исследованиями установлено, что главный рудный минерал, содержание которого в руде составляет порядка 70%, представлен тремя генерациями, различающимися морфологическими особенностями, составом и свойствами. Количественно в руде преобладает родохрозит II генерации тонко-мелкокристаллического строения с содержанием марганца 38,6-39,0%. Родохрозит I генерации скрытокристаллического строения, содержащий 42,15-43,85% марганца, присутствует в весьма незначительном количестве. Родохрозит III генерации, присутствующий в виде прожилков и гнездовидных выделений, имеет крупно-среднекристаллическую структуру и содержит 34,18-34,54% марганца, также встречается в подчиненном количестве. Особенностью родохрозита II являются многочисленные включения силикатов марганца (пироксмангита, бементита, фриделита и тефроита). Характер сростания силикатов марганца с родохрозитом, по данным рентгенотомографического анализа, однозначно свидетельствует о невозможности избавиться от них и селективно выделить карбонатные марганцевые минералы в отдельные продукты физическими методами сепарации. Исходя из этого следует, что качество концентратов будет определять доминирующий в руде родохрозит II и силикаты марганца, отвечающие за варьирующее содержание кремнезема в продуктах обогащения.

На качество марганцевых продуктов и концентратов в значительной степени влияет содержание в них фосфора, а, следовательно, его минеральных фаз. В карбонатных и окисленных марганцевых рудах Усинского месторождения впервые установлены минералы фосфора: апатит, кингсмаунтит и штрентит (рис.2).

При этом следует отметить, что для идентификации и определения характера распределения минеральных фаз фосфора пришлось использовать дорогостоящие и трудоемкие методы аналитической электронной микроскопии. Это лишний раз подчеркивает, что современные руды даже при их прогнозной технологической оценке требуют применения расширенного комплекса минералогических методов исследования.

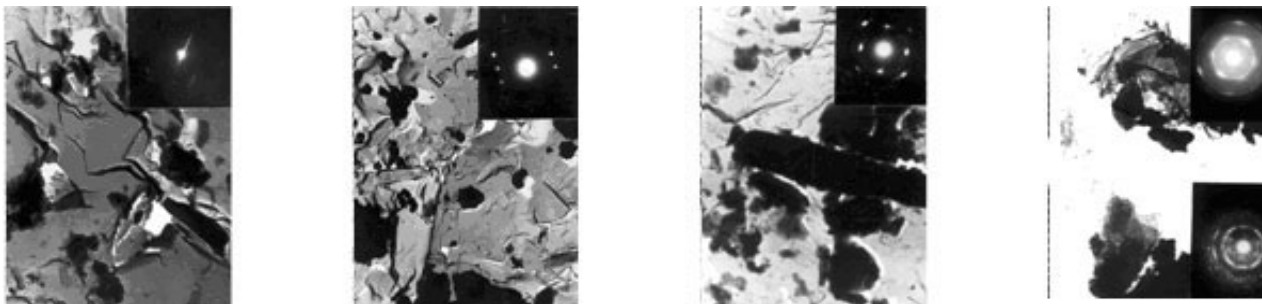
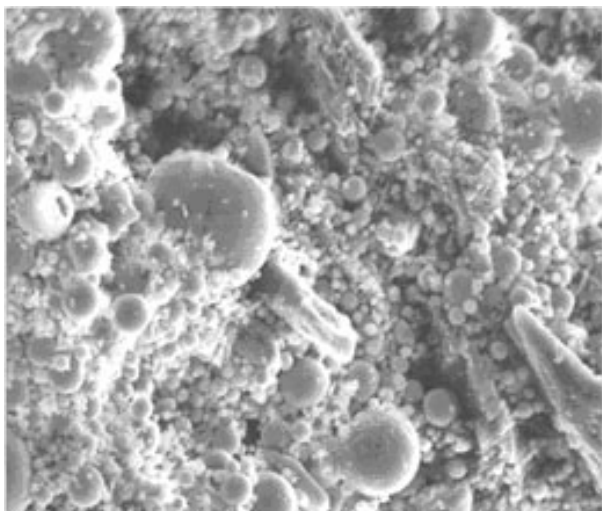


Рис. 2. Минеральные формы фосфора в рудах Усинского месторождения:

а) Кингсмаунтит в родохрозите. Реплика со скола, увел. 22000; б, в) Апатит в родохрозите. Реплика со скола, увел. 16000 и 9000 соответственно; г) Штрентит в рансейт-гетитовом агрегате. Реплика со скола, увел. 10000

Не менее интересны в плане применения методов технологической минералогии для прогнозной оценки техногенного сырья породные отвалы угольных месторождений (терриконы). В качестве примера в отвалах Ростовского угольного бассейна, содержится 22,3% Al_2O_3 , 55,45% SiO_2 , 6,7% Fe_2O_3 . Минералогическими исследованиями установлено, что «спек» угля представляет собой достаточно однородный материал скрытокристаллического строения, в котором неравномерно распределены вкрапленники рудных фаз различной формы и размеров. Матрица «спека» обнаруживает гетерогенное строение, что связано как с неравномерным распределением главных техногенных фаз, так и с различным содержанием «порообразующих» компонентов в единой рентгеноаморфной фазе, на долю которой приходится 50%.

Наряду с кварцем, являющимся главной минеральной фазой, установлены индивидуализированные зерна муллита и кордиерита, в подчиненном количестве присутствует полевой шпат.



**Рис. 3. Кремнисто-алюминиевые и алюминице-кремни-
стые образования. Растровый электронный микроскоп**

Электронно-микроскопическим анализом выявлено, что рентгеноаморфная фаза большей частью сложена плотно упакованными округлыми выделениями размером от сотых долей до 1 мкм, полыми внутри, имеющими алюминий – кремнистый состав и кремнисто-алюминиевый состав (рис.3). Содержание алюминия в них варьирует от 9,8% до 30,6%, а кремния – от 11,9% до 46,9% .

Полученные данные позволяют говорить о потенциальной возможности использования угольных отвалов в качестве алюминиевого сырья. Однако, форма нахождения алюминия и размер выделений потребуют разработки специальных технологий получения глиноземистых продуктов.

В связи с тем, что современные минерально-сырьевые объекты, в большинстве своем, относятся к категории труднообогатимых, в последние годы резко возросла роль прикладных минералогических исследований, которые позволяют с достаточно высокой степенью достоверности проводить прогнозную технологи-

ческую оценку полезных ископаемых на разных стадиях изучения и освоения месторождений. Совершенно очевидно, что технологическая минералогия с каждым годом приобретает все большее значение в комплексе геологоразведочных работ, в первую очередь, новых видов сырья. Ее методы и приемы позволяют с минимальными затратами проводить оценку технологических свойств сырья, и способствуют созданию эффективных технологий их переработки, предусматривающих максимально возможное извлечение всех полезных минералов.

ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ НАНОМИНЕРАЛЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

О.Б.Котова

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН

В нашу жизнь входят индустриальные наноминералы. Это отражается не только в общих тенденциях перехода научных исследований на наноуровень, не только в научных и технических достижениях этого направления, но и в скачке финансирования нанотехнологий и поддержке научных программ как приоритетных междисциплинарных направлений науки и техники [9]. Представление о масштабности и динамике развития дисциплин нанотехнологического направления можно получить и по экспоненциальному росту числа публикаций.

Понятие нано- в свете современных проблем технологической минералогии и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья не ново, но понимание всего спектра перспектив и возможностей только формируется. Сегодня основным объектом обогащения является не только руда (традиционный объект внимания технологов-обогащателей), по промышленной значимости не менее главным объектом обогащения становятся техногенные образования, а основные тенденции развития рудоподготовки к обогащению заключаются в снижении конечной крупности продукта [2]. В технологические схемы вовлекаются тонкодисперсные руды, учет размерности частиц становится определяющим фактором в технологиях обогащения. Вовлечение нового поколения минерального сырья – индустриальных наноминералов в обогащательные технологии ведет к изменению понятия самого полезного компонента. Наноразмерные технологии предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда появляется возможность управления технологическими процессами на уровне формирования полезного компонента [4, 7].

Проникновение в наноразмерную технологическую минералогию начинается с осознания понятия поверхностей или приповерхностной области S наноминерального вещества. С уменьшением размеров в области 1-100 нм наноминерал как структурная единица представляется почти пределом в увеличении площади поверхности. Высокая область поверхности (площадь поверхности) обеспечивает очень специфические характеристики наноминералам, которые и создают непредсказуемый потенциал нанотехнологиям, в том числе и в процессах обогащения. Речь идет о необычных физических, химических и механических свойствах наноминералов, изменяющих кинетические и динамические характеристики. Кроме того, для нанообъектов характерно другое время протекания процессов и явлений: в силу особых физико-химических и геометрических ха-

рактических возрастает «быстродействие». Временная зависимость параметров системы частиц и случайный характер их образования предполагает наличие дуализма наносистем.

Сегодня существует несколько методов получения наноминералов: плазменное; осаждение из газовой фазы, включая диссоциативную фотосорбцию; электроосаждение; синтез из гелевых растворов; ударное измельчение; природное образование.

Действие плазмы. В процессе действия плазмы сочетание очень высокой температуры с плазменной дугой используется для эффективного отделения атомных структур от основной массы вещества, которые вне плазмы быстро рекомбинируют в наночастицы.

Химическое осаждение из газовой фазы (включая диссоциативную фотосорбцию). Газовые молекулы избирательно реагируют с поверхностными центрами, образуя на поверхности определенные структуры (возможны случаи образования структур с последующим осаждением на поверхность подложки). Продукты реакций могут контролироваться, причем не только относительно состава, но и уровня нанометрического образования.

Электроосаждение. Электроосаждение включает аналогичные процессы, только контролируемая фаза осаждается из раствора, на который воздействует электрическое поле.

Синтез из гелевых растворов. Эта технология подходит для покрытия больших поверхностей определенных нанометрических соединений после отжига.

Ударные столкновения используются для разделения макроскопического вещества на нанокристаллические составляющие без изменения химического состава.

Природные образования нанобъектов могут формироваться примерно по тем же механизмам, которые лежат в основе лабораторных и промышленных методов [1, 4, 5, 9].

Указанные подходы становятся составной частью технологий комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Особую роль играет энергетика. Огромные возможности энергии поверхностных процессов наглядно продемонстрированы в адсорбофизических методах сепарации.

Предложенные адсорбофизические методы сепарации базируются на результатах исследования кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий (рис. 1). Впервые установлена возможность активации (модификации) поверхности тонкодисперсных минеральных систем за счет избирательного взаимодействия поверхностных центров с молекулами газовой фазы в физических полях. Показано влияние адсорбофизических полей на физико-химические параметры исследуемых систем, которое обусловлено связью адсорбированной фазы и объема на электронном, атомарном, и молекулярном уровнях. Выявлены новые свойства минералов при модификации поверхности в процессе нарушения адсорбционно-десорбционного равновесия: адсорбоэлектрические, адсорбомагнитные, адсорбооптические, в том числе адсорболюминесцентные. Установлен механизм и природа поверхностного некомпенсированного заряда – базового параметра формирования энергетики наносистемы.

Например, адсорболюминесцентные методы сепарации, в основу которых положено явление фотоиндуцированной адсорболюминесценции [8]. При взаимодействии водородсодержащих молекул с фотоиндуцированными дырочными центрами типа O^- тонкодисперсных минеральных систем происходит диссоциативный развал молекулы с образованием возбужденной гидроксильной группы OH^* и радикала R^* , например



где HR – водородсодержащая молекула газовой фазы, при этом на многих образцах оксидных тонкодисперсных минеральных систем (ТМС) наблюдается люминесценция. Если с фотоиндуцированными центрами O^- ТМС взаимодействуют молекулы метана, то избыточная энергия при диссоциативной адсорбции определяется:

$$Q_{адсCH_4} + Q_{адсCH_3} + Q_{обрOH} = Q_{дис.адс} + E_{воз}, \quad (2)$$

где $Q_{адсCH_4}$ – энергия, выделяющаяся при диссоциативной адсорбции CH_4 ;

$Q_{адсCH_3}$ – энергия адсорбции радикала на поверхности;

$Q_{обрOH}$ – энергия, выделяющаяся при образовании OH -групп на поверхности;

$Q_{дис.адс}$ – энергия диссоциативной адсорбции метана.

Энергия возбуждения $E_{воз}$ может идти либо на возбуждение центра люминесценции



либо на возбуждение комплекса, состоящего из активного центра и адсорбированной молекулы. Результаты проведенных исследований фотоиндуцированной адсорболюминесценции (ФИАЛ) позволили предположить, что коротковолновая часть спектра принадлежит OH -группам, так как при увеличении гидроксильного покрова тонкодисперсных оксидных систем в результате реакции (1) наблюдается возрастание интенсивности фотоиндуцированной адсорболюминесценции в синей области, в то же время кислород наиболее активно «тушил» эту часть спектра.

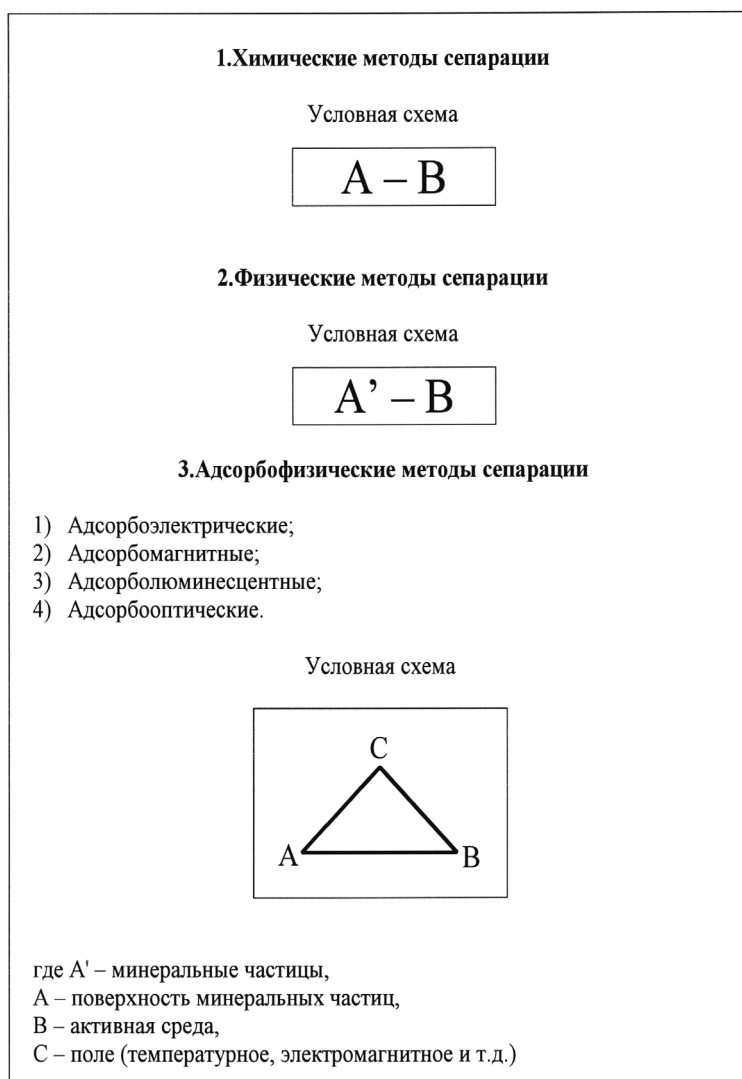


Рис. 1. Условные схемы основных принципов химических, физических и адсорбифизических методов сепарации

Очевидно, что при диссоциативной адсорбции водородсодержащих молекул типа HR на фотоиндуцированных дырочных центрах на поверхности оксидсодержащих тонкодисперсных минеральных систем образуются возбужденные группы OH:



что сопровождается люминесценцией тонкодисперсных минеральных систем.

Вовлечение новой генерации минерального сырья в обогащательные технологии ведет к изменению понятия самого полезного компонента. Сегодня среди промышленных наноминералов наиболее известны нанокompозиты, нанотрубки, нановолокна (рис. 2). За последние 70-80 лет синтезировано несколько сот различных нанообъектов – частиц, материалов, структур. Это кентавры, коацерваты, тактоиды, фазоиды, аллофены, гигантские кластеры, фуллерены, фуллероиды, нанотрубки и т.п. При таком многообразии наблюдаемых частиц и структурной неоднородности наносостояния законы строения наночастиц будут отличаться от классической кристаллографии. В большинстве случаев наноминералы превосходят в своих свойствах по отношению к обычным аналогам. Например, материал с использованием углеродных нанотрубок в 100 раз прочнее стали (Industrial minerals, 2005). Нанокристаллы благодаря своей способности менять длину световой волны значи-

тельно увеличат возможности оптических свойств материалов. Наибольший интерес представляют оксидные наноминералы [1, 4, 9]. Наиболее активно разрабатывается использование оксидных наноминералов в области катализа. Оксидные наноминералы позволяют создавать наноразмерные активные слои, которые способны заменить традиционно применяемые драгоценные металлы и сплавы, используемые в преобразователях для снижения выбросов угарного газа, гидрокарбонатов и оксидов азота. В этом плане практический и теоретический интерес представляют результаты исследований окислительно-восстановительных реакций в системе газ-тонкодисперсные минеральные системы с участием поверхностно активных центров и фотосорбированных молекул газовой фазы (например, молекул кислорода).

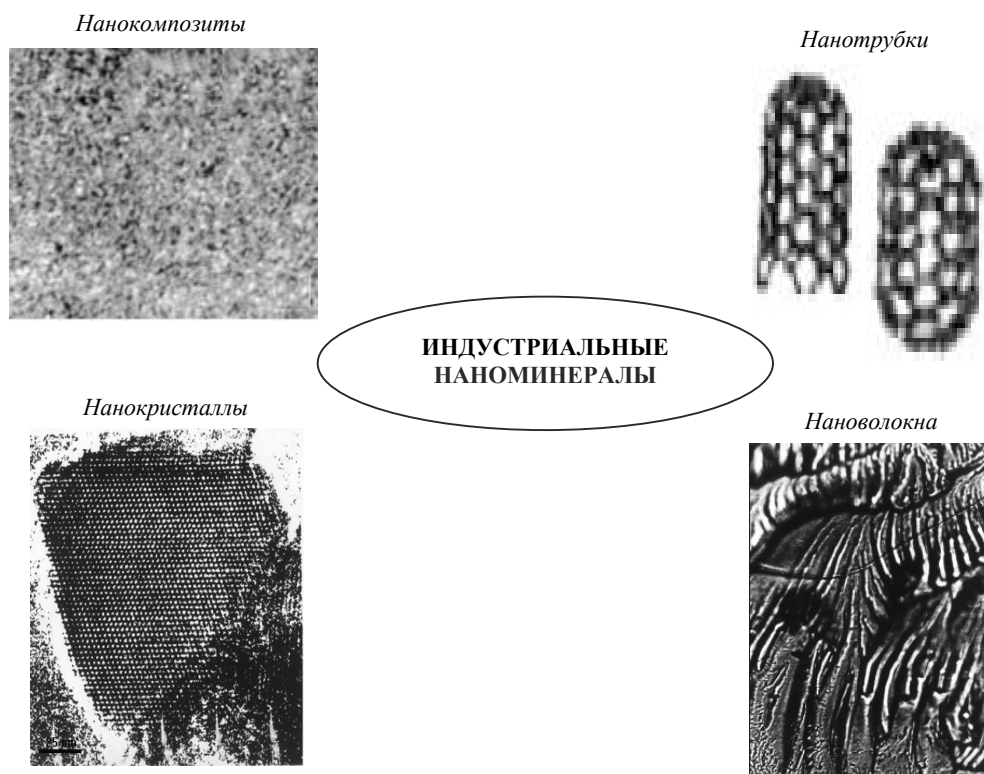


Рис.2. Наиболее известные нанокмпозиты индустриальных наноминералов

Таковыми реакциями являются реакция окисления CO и NO, которые идут с участием поверхностных активных центров, концентрация которых зависит от длины волны облучения. Показано, что эти монооксиды представляют наибольший интерес для фотокаталитических реакций. Являясь продуктами неполного окисления, они наиболее активны и в уже незначительных концентрациях представляют собой смертельные яды. Наиболее хорошо реакции полного окисления этих газов были исследованы на рутиле, однако они наблюдались и на других оксидных кристаллах [4].

В темновых условиях реакция окисления CO и NO происходит по окислительно-восстановительному механизму. Очевидно, что механизм фотокаталитического окисления CO подобен темновой реакции окисления, хотя детальные механизмы обоих процессов могут быть различны. В частности, в темновых реакциях отсутствует стадия



где $\underline{O}^{2-}$, $\underline{O}^-$ – кислородные ионы, локализованные в приповерхностной области оксидных кристаллов. В темновых условиях роль активных центров играют низкокоординированные ионы кислорода в зарядовом состоянии, близком к (-1).

Фотоактивированные формы поверхностного кислорода при облучении поверхности тонкодисперсных минеральных систем исследовались с помощью «меченых» атомов кислорода. Показано, что не все формы

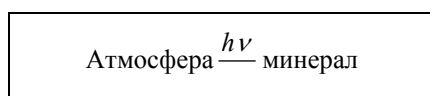
кислорода одинаково активны. Так, в реакции окисления высокую активность проявляет только ион-радикалы $\underline{O}^-$, локализованные в приповерхностной области тонкодисперсных оксидных кристаллов. Ион-радикалы $\underline{O}^{2-}$, $\underline{O}_3$ не обладают подобной активностью.

Показано, что облучение приводит к перестройке поверхности тонкодисперсных оксидных кристаллов за счет процессов дефектообразования. При этом часть решеточного кислорода переходит в адсорбированную форму, как это происходило на кристаллах Ga_2O_3 и других образцах. При нагреве La_2O_3 происходит разрушение решетки, в газовую фазу выделяется кислород. Такие вещества можно использовать как генераторы кислорода. Известно, например, что гидрид титана используется как генератор водорода, а перманганат калия как генератор кислорода [4]. Для получения молекул азота используется реакция



наблюдается на поверхности тонкодисперсных оксидных кристаллов в результате фотосорбции N_2O на электронных центрах [10].

Тонкодисперсные оксидные кристаллы интересны тем, что фотокаталитическая активность их сдвинута в длинноволновую область по сравнению с соответствующими реакциями в газовой фазе. Реакции в адсорбированном веществе могут протекать по другому механизму, чем в газовой фазе. В системе



можно наблюдать переход кислорода из одной формы в другую (из адсорбированной формы в структурный кислород и наоборот). Например, при облучении тонкодисперсных кристаллов La_2O_3 происходило разрушение решетки и выделение кислорода решетки в газовую фазу при $T \sim 300$ К. Таким образом, приповерхностная область минералов при длинноволновом облучении способна осуществлять функции регулирования состава атмосферы и может быть использована как генератор кислорода, водорода и других газов [3].

Благодаря своим уникальным свойствам наноминералы затронут, очевидно, все области, начиная от глобальных коммуникаций до нашей одежды (сохранность лесов, регенерация океанов и атмосферы, медицина и т.д.) [1, 5, 9].

Важную роль, несомненно, будут играть наноминералогические исследования как основа для дальнейших разработок в области технологической наноминералогии направленного модифицирования физико-химических свойств минералов с целью расширения возможностей обоганительных нанотехнологий. Приоритетными исследованиями в этом направлении представляются кристаллохимические и кристаллофизические исследования в системе газ-наночастица в физических полях [4]. Важным параметром, определяющим эффективность модификации поверхности, является отношение площади поверхности к объему, которое будет зависеть не только от размеров, но и от геометрии наночастиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захарова Г.С., Волков В.Л., Ивановская В.В., Ивановский А.Л. Нанотрубки и родственные наноструктуры оксидов металлов. УрО РАН, 2005. – 240 с.
2. Изюмко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. -592 с.
3. Котова О.Б. Индустриальные наноминералы в свете современных проблем комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья // Материалы международного совещания «Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2005). СПб.: Роза мира, 2005. С. 135–137.
4. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. УрО РАН, 2004. – 195 с.
5. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. – СПб.: Наука, 2005. – 581 с.
6. Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2005): Материалы международного совещания. СПб.: Роза мира, 2005. – 423 с.
7. Чантурия В.А. Современное состояние и основные направления развития флотации // Материалы международного совещания «Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья» (Плаксинские чтения-2005). СПб.: Роза мира, 2005. С. 11–17.
8. Kotova O. Adsorbophysical characteristics of precious metals in comparison with other minerals // J. Minerals Engineering, 2004. Vol.17(6). P. 833–837.
9. Industrial minerals. Metal Bulletin plc., UK – January, 2005. – P. 80.
10. YUN C., ANRO M., MIZOKOSHI Y., KUBOKAWA Y. Oxidation of alkanes and alkenes by N_2O over UV-irradiated MgO .- Chemistry Letters, 1980.- P.799-802.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ КАРЕЛИИ

Щипцов В.В.

Институт геологии КарНЦ РАН, e-mail: shchipts@krc.karelia.ru

Свое достойное место заняла новая область прикладной минералогии – это технологическая минералогия, предметом которой является изучение минералов как объектов переработки с помощью различных методов. Технологическая минералогия стоит в авангарде современных направлений развития теории и практики обогащения руд, что позволяет совершенствовать технологические процессы, разрабатывать и научно обосновывать новые технологические подходы и технические решения; интенсифицировать технологии обогащения различных руд на основе направленного изменения свойств минералов.

Методы исследований технологической минералогии в значительной степени связываются с типоморфными особенностями минералов и минеральных ассоциаций, влияющими на показатели переработки руд, т.е. на технологические свойства руд и минералов. В.М.Изоитко [1] обобщила материалы по технологической минералогии относительно железных, медно-никелевых, вольфрамовых, оловянных, медных и полиметаллических руд, золота и платины и показала их существенное влияние на совершенствование технологических схем, вовлечение в переработку новых промышленных типов месторождений и руд. Имеется большое количество публикаций, посвященных технологической минералогии конкретных руд, например, железных [2], оловянных [3] и др. Методы технологической минералогии с таким же успехом применимы и по отношению к индустриальным минералам. Нельзя не отметить работы В.И.Ревнивцева по кварцу и полевому шпату [4], О.Б.Дудкина [5] и другие. В свое время В.М.Изоитко и автор данной статьи планировали подготовить общую монографию, включающую технологическую минералогия металлов и индустриальных минералов и связывающие их проблемы комплексного использования. Думается, что не надо забывать об этом и в перспективе осуществить данный проект.

Под понятием «индустриальные минералы» понимаются полезные ископаемые, близкие по значению к неметаллическим. Химические и физические свойства определяют их использование во многих областях промышленного производства без процессов металлургического передела. В этот большой класс входит минеральное сырье (минералы и горные породы), извлекаемое человеком из недр, кроме металлов, энергетических видов полезных ископаемых, воды и самоцветов. Целью технологического опробования на ранней стадии предварительной оценки индустриальных минералов Карелии являлась постановка задачи по выявлению зависимостей между качеством руды и показателями переработки. Все приводимые данные основываются на двух видах технологических проб – малообъемные лабораторные и минералого-технологические с массой проб от 2 до 100 кг, т.е. объектом были в основном природные типы руд за редким исключением тех случаев, когда на основе опытов на промышленных сортах руды разрабатывалась технологическая схема с отбором массы проб свыше 200 кг (гранат, чешуйчатый мусковит, анортозит, кианит, апатит). На первом этапе исследуются вкрапленность минералов и крупность материала, включая максимальную. И наконец роль технологической минералогии проявляется перед стадией выбора качественной схемы обогащения, когда получена информация о вещественном составе полезного ископаемого.

Квинтэссенция технологического опробования – это создание или уточнение схемы переработки полезного ископаемого, необходимой для получения товарной продукции с определением показателей переработки (выход продукции, извлечение полезных компонентов, качество продукции), а также предполагаемый расход воды, энергии, реагентов, флюсов и других материалов. При выборе схем переработки руд индустриальных минералов, как правило, доминирующее значение придается наиболее контрастным свойствам минерала, присущим только одному в ассоциации с другими минералами.

Геологические обстановки формирования индустриальных минералов Карелии имели широкий пространственно-временной диапазон в шкале архей-протерозой-фанерозой, характеризующийся своими особенностями, и основные черты которых схематично показаны в таблице 1.

Таблица 1

Геологические обстановки формирования индустриальных минералов Карелии

Основная геологическая обстановка	Индустриальный минерал
Архейские гранито-гнейсовые поля с интенсивно, умеренно и слабо реактивизированными областями	Полевой шпат, кварц, мусковит, гранат, графит, кианит, пирит, корунд, сподумен
Структурно-формационные комплексы лопийских зеленокаменных поясов	Кварц, гранат, графит, кианит, мусковит, пирит, ставролит, тальк
Области развития свекокарельских осадочно-вулканогенных и вулканических толщ	Кварц, тальк, шунгит, графит, полевой шпат, барит, андалузит
Рифейско-вендский комплекс	Кварц, флюорит, Ba-Sr полевой шпат, волластонит
Дифференцированные интрузии от ультраосновного до кислогощелочного и карбонатитового состава архейского и протерозойского периода	Апатит, кальцит, полевой шпат, барит, ильменит, титаномagnetит, magnetит, хромит, асбест, тальк, магнетит, пирит, оливин
Фанерозойские осадочные комплексы	Диатомит, сапропель

Месторождения и проявления индустриальных минералов и горных пород докембрия Карелии относятся к эндогенным образованиям и выделяются следующие классы: магматические (апатит, титано-магнетит, ильменит, полевой шпат, анортозит, хромит, оливинит, геллефлинта, кварцевый порфир, нефелиновый сиенит и др.); пегматитовые (мусковит, полевой шпат, кварц, сподумен, турмалин и др.); карбонатитовые (апатит, кальцит, магнетит и др.); постмагматические (апатит, барит, флюорит, полевой шпат, кварц, кианит, пирит, ставролит, тальк, гранат и др.), метаморфизованные и метаморфические (графит, тальк, рибекит-асбест, шунгиты, кианит, ставролит, гранат, пирит, тальковый камень, серпентинит, диопсид и др.).

Признаки типоморфных особенностей минералов имеют два порядка. Первый порядок – это признаки, зависящие от условий образования. К ним относятся химический состав, присутствие элементов-примесей, структура (параметры, дислокации и т.п.), конституция, структурно-текстурные особенности породы (морфологический тип текстуры, типы сростаний минералов, морфология и гранулометрия минеральных агрегатов), степень выветривания, поверхностные пленки и другие свойства минералов и горных пород. Второй порядок – это признаки, производные от первого порядка. К ним относятся физические и механические типоморфные свойства (цвет, прозрачность, контактная электризация, твердость, микротвердость, хрупкость, упругость, пластичность, пористость, сорбция, адсорбция, растворимость, реакционная способность, коэффициент анизотропии, люминесцентность, радиоактивность и др.).

Для индустриальных минералов типоморфизм первого порядка играет важную роль при оценке практической значимости получаемого концентрата. К этим примерам относятся следующие заключения: тонкодисперсный рутил в кианите трудно извлекаем, что ограничивает области применения кианитового концентрата в промышленном использовании (требования по содержанию TiO_2 для керамических материалов – не более 0,2, а в иных случаях 0,01%), природное срастание мусковита с биотитом резко сужает возможности использования тонкомолотого мусковита в производстве красок, пластиков и бумаги, прораствание граната с другими минералами не лучшим образом влияет на выбор областей его применения – для фильтрации воды не допускается готовый продукт к использованию, если содержание граната меньше чем 97% и др. Структурно-текстурные особенности метаморфических пород играют особую роль при обогащении. Такая зависимость определяется влиянием регионального метаморфизма на технологические свойства графитоносных пород Приладожья, выявленная Н.С. Бискэ [6]: графитовые руды зон низкотемпературного метаморфизма имеют низкую флотационную обогатимость при содержании тонкодисперсного графита в них свыше 60%, в то же время в условиях высокотемпературного метаморфизма амфиболитовой фации образованы легкообогащаемые высококачественные руды с крупночешуйчатым графитом при содержании 2,8-5,9% (Ихальское месторождение). Для трех типов ильменитовых руд месторождения Суриваара обнаружены отличия по вещественному составу, количественному соотношению минералов и текстурно-структурным особенностям, что разделяет эти руды на легко-, средне- и труднообогащаемые (рис.1). Характер распределения TiO_2 в магнитной и немагнитной фракциях исследуемые пробы месторождения Суриваара (Елетьозерский массив) позволил сделать следующий вывод: содержание TiO_2 в магнитной фракции равно содержанию TiO_2 в немагнитной фракции – труднообогащаемые (12,5%); содержание TiO_2 в магнитной фракции больше чем содержание TiO_2 в немагнитной фракции – среднеобогащаемые (75%); содержание TiO_2 в магнитной фракции меньше чем в немагнитной фракции – легкообогащаемые (12,5%). При лабораторных исследованиях ильменитовых руд месторождения Суриваара использовалась сухая электромагнитная сепарация с напряженностью поля не выше 850 кА/м [7]. Основными рудными минералами являются магнетит, титаномагнетит и ильменит. Минеральный состав, текстурные и структурные особенности руды определяют раскрываемость ильменита в процессе дробления и измельчения. Наиболее быстро освобождаются от сростков крупновкрапленные руды, значительно хуже тонковкрапленные.

Наиболее часто используемые типоморфные особенности второго порядка являются важными в характеристике индустриальных минералов и определяющими в технологическом использовании. Например, использование контрастных свойств микроклина делает возможным получение готового продукта из пегматитов при обогащении методом рентгенорадиометрической сепарации для замены неэффективной ручной рудо-разборки [8].

Некоторые особенности в исследованиях и оценка на ранних стадиях изучения показаны на примере двух месторождений Карелии.

Хизоваарское месторождение кианитовых руд

История изучения кианитовых руд очень поучительна, так как она отражает эволюционный переход от оценки их использования для получения алюминия, затем для производства силумина и, наконец, кианит становится практически ценным индустриальным минералом, химические и физические свойства которого стали предметом внимания, в первую очередь, для использования в огнеупорной и керамической промышленности.

Анализ процессов рудогенеза Хизоваарского кианитового поля позволил определить условия формирования и локализации оруденения, а также потенциальную рудоносность нескольких участков [9, 10]. Проблема генезиса и формирования кианитовых руд месторождения рассматривается в рамках теории метасоматоза [11] и метасоматического рудообразования [12, 13, 14] прежде всего той ее части, которая геохимически ха-

рактируется как область фации кислотного выщелачивания [15, 16] и петрологически связана с регрессивными и диафорическими процессами в пределах кианит-силлиманитовой фациальной серии повышенных давлений [17, 18]. Кианитовые руды представлены тремя природными типами – метаморфогенные (лопийский тектоно-магматический цикл), метаморфогенно-метасоматические и метасоматические (свекофенский тектоно-магматический цикл). Наиболее важными с практической точки зрения являются руды метаморфогенно-метасоматического типа.

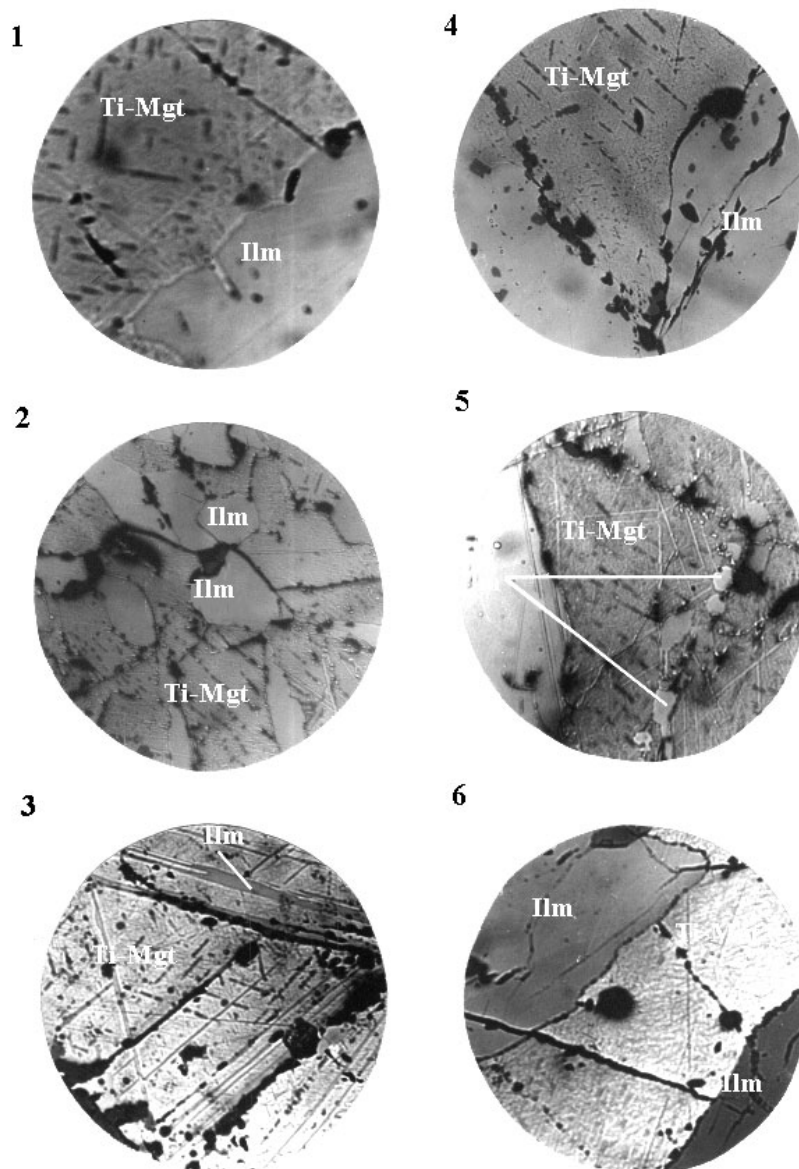


Рис. 1. Морфолого-структурные типы ильменитовой руды (месторождение Суриваара, Елетьозерский массив)

1 – контакт зерен ильменита с титаномагнетитом (х 40); 2 – контакт зерен ильменита с титаномагнетитом (х 40); 3 – мелкозернистый ильменит в титаномагнетите (х 40); 4 – мозаичный ильменит в титаномагнетите (х 40); 5 – структура распада титаномагнетита (х 40); 6 – характер выделений ильменита в среднезернистом габбро (х 36)

Выделены три активных фактора контроля: литостратиграфический, метаморфогенно-метасоматический и структурный по аналогии с петрологически родственными образованиями мусковитовых пегматитов Беломорской слюдоносной провинции [19, 20]. *Литостратиграфический фактор* отражает приуроченность интенсивного кианитообразования к метаморфитам преимущественно нижней части Хизоваарского стратиграфического разреза, где впервые были установлены два «горизонта» высокоглиноземистых сланцев.

Нижний «горизонт» на основании целого ряда прямых и косвенных признаков предположительно характеризуется как продукт метаморфизма химической коры выветривания с содержанием глинозема до 24% и

выше, образованной по вулканитам андезитового состава. Верхний «горизонт» глиноземистых сланцев входит в граувакковую часть разреза и формировался в той или иной мере за счет вулканогенных пород андезитового состава. По содержанию глинозема породы верхнего «горизонта» более бедные (18.5-21.0%).

Метаморфогенно-метасоматический фактор. К настоящему времени все имеющиеся материалы позволяют говорить о многоэтапном проявлении регионального метаморфизма. Метаморфизм раннего (из документируемых) этапа проявлен в условиях гранат-кианит-биотит-ортоклазовой субфации с переходом к ставролит-жедрит-кианитовой и гранат-кианит-биотит-мусковитовой субфаций кианит-силлиманитовой фациальной серии, по В.А. Глебовицкому.

Кислотные метасоматиты Хизоваары формировались в условиях кварц-кианитовой фации метасоматоза, на что указывали В.А. Глебовицкий и С.А. Бушмин [18]. На примере участка Южной линзы отмечается, как высокая активность летучих приводит к устойчивости пирита и турмалина во внутренних зонах рудного тела.

Структурный фактор рассматривается на основе данных о многоэтапности развития района, а структурная локализация рудных метасоматитов отражает связь определенных фаций со структурами.

Молодые наложенные структуры свекофеннского цикла являются рудоконтролирующими. Локальный поисковый структурный критерий для кианитовых руд метаморфогенно-метасоматического и метасоматического происхождения представляет собой сопряжение в пространстве двух возрастных групп структур – ранних субширотных с наклонными осевыми поверхностями и поздних субмеридиональных (и северо-западных) с преимущественно крутыми осевыми поверхностями. Формирование субмеридиональных структур относится к одновременному свекофеннскому этапу, что сближает аналогию с полями мусковитовых пегматитов северной Карелии.

Минералогические особенности

В кианитовой руде Хизоваарского месторождения отмечены три разновидности кианита, различающиеся по цвету и морфологии: (1) серые, преимущественно тонкоигольчатые; (2) темно-серые игольчатые и мелко таблитчатые; (3) голубые таблитчатые. Методом ИКС устанавливаются отличия в состоянии поверхности кианита, взятого для анализа из монофракций (рис. 2).

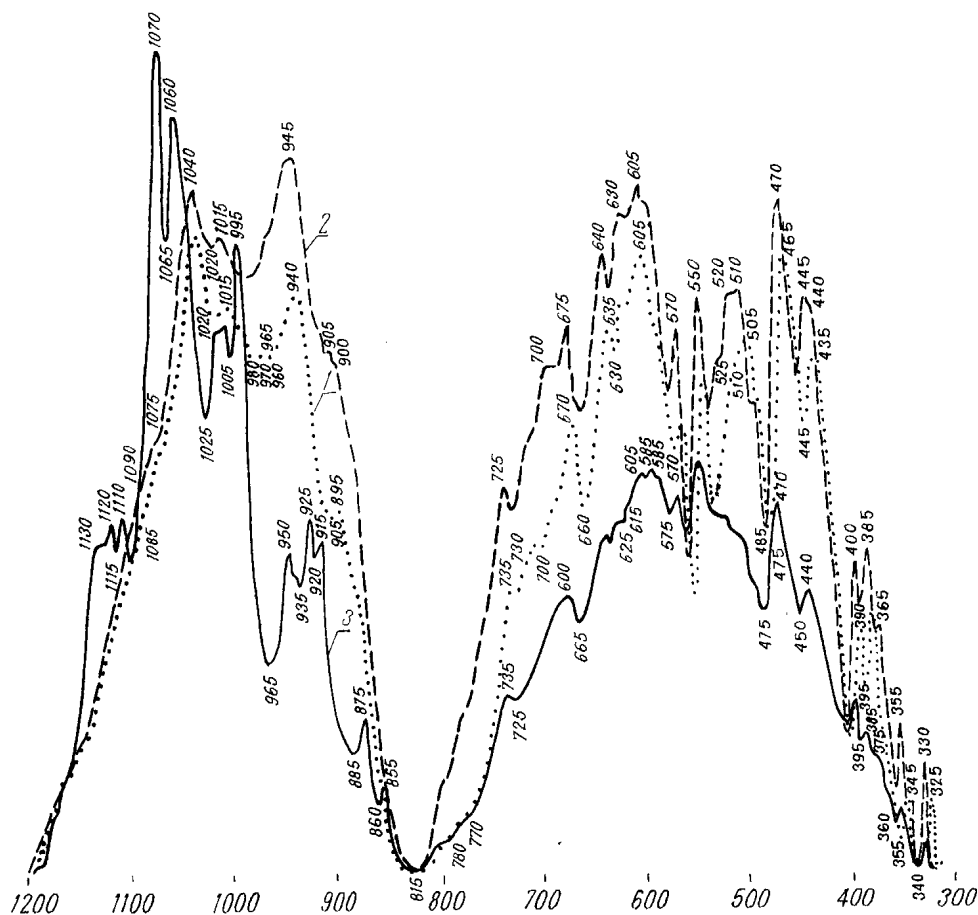


Рис. 2. ИК-спектры кианита:

1 – белого; 2 – серого; 3 – голубого цвета

В зернах кианита присутствуют валентно и координационно ненасыщенные атомы алюминия, размещение которых для кианита трех разновидностей отличается различной степенью упорядочения. Наиболее высокочастотная часть спектра близки у светло-серого и темно-серого кианитов, голубой по ИК-спектру существенно отличается в силикатной части, структурирован и обладает более совершенной упаковкой.

Размер и форма зерен кианита, наличие вростков других минералов специфичны для определенных разновидностей. Светло- и темно-серый кианиты, как правило, образуют игольчатые кристаллы с размерами 0.16x0.05 – 4.3x1.6 мм. Кианит содержит много включений кварца размерами 0.03-0.07мм, рутила размером до 0.03 мм и иногда включения пирита. Отмечается замещение пирита лимонитом с образованием бурого налёта гидроокислов железа на зернах кианита.

Голубой кианит имеет вид коротких и широких табличек с изъеденными контурами и разбит трещинками по плоскости пинакоида. Размер табличек 1 x 1.5-2 мм. Содержание включений других минералов в этом кианите и ожелезнение минимально. Основную массу породы составляет кварц. Размер зерен его колеблется от 0.05 до 2.5 мм. Рутил чаще наблюдается внутри зерен кианита и на контакте с зернами кварца. Размеры его зерен от 0.1 – 0.01 мм до тонкодисперсного.

Технологические испытания на обогатимость кианитовой руды Хизоваарского месторождения выполнены с применением флотации [9, 21] и позволили получить кианитовый концентрат с классом раскрытия кианита – 0.16-0.1 мм, с относительным содержанием в свободных зернах 85-95% и извлечением кианита в концентрат – 65-70%. Данные параметры достигаются только при обогащении метаморфогенно-метасоматического типа кианитовой руды. Качество концентрата может улучшаться за счет перерешивки и применения обработки пульпы ультразвуком перед обесшламливанием. Товарный продукт удовлетворяет требованиям огнеупорной промышленности и других российских производств и не уступает по свойствам американскому кианиту, который на рынке выступает в качестве эталона.

Тикшеозерское месторождение апатитсодержащих карбонатитов

В составе Тикшеозерского массива выявляется значительное разнообразие пород при резком преобладании пироксенитов, а также обнаружены разнообразные метасоматиты, карбонатно-силикатные породы, карбонатиты и нефелиновые сиениты. Происхождение магм карбонатитов и пород щелочно-ультраосновного ряда традиционно относят к мантийным источникам, а [22] образование конкретной карбонатитовой магмы объясняют механизмом затягивания в ювенильную магму океанической коры и осадков в зонах поддвига литосферных плит.

Площадь Тикшеозерской интрузии составляет около 35 кв.км с максимальной протяженностью в меридиональном направлении не менее 8 км, широтном – 5 км. Апатитсодержащие карбонатиты относятся к комплексному типу руды, где главную роль играли кальцитовые карбонатиты. Из других карбонатов присутствуют доломит-анкерит, образующие изоморфный ряд, и в качестве аксессуарных – арагонит и анкилит. Отличительная особенность карбонатитов Тикшеозерского массива – повышенное содержание в них окиси кальция, по содержанию которого выделены высококальциевая (СаО от 35.11 до 51.80%) и магниевое-кальциевая (СаО от 23.36 до 39.40%) разновидности. Кальциевые карбонатиты, помимо вышеназванных карбонатов, содержат в небольшом количестве сопутствующие флогопит, оливин, биотит, магнетит и другие минералы. К менее распространенным разновидностям относятся доломит-кальцитовые и кальцит-доломитовые карбонатиты с эгирином, оливином, рихтеритом, флогопитом, тремолитом, магнетитом и другими минералами. Установлено присутствие мелких жил барита. Среднее содержание P_2O_5 4.3%.

В докембрийских магматических породах Карелии апатит присутствует повсеместно в виде мелких зерен или богатых скоплений. Широкое распространение этого минерала предопределило детальную изученность его химического состава. Одним из примеров являются результаты исследований редкоземельных элементов (РЗЭ) в апатитах из древних «серых» гнейсов и разновозрастных щелочных интрузивных комплексов: Тикшеозерский щелочно-ультраосновной карбонатитовый массив на севере Карелии с возрастом 1980 млн лет, Элисенваарский массив щелочно-ультрамафитовых пород калиевого ряда на юге с возрастом 1550 млн лет [23]. Уровню содержаний и особенностям распределения РЗЭ в апатитах (рис. 3 а-г) свойственны характерная направленность в изменениях относительных концентраций элементов от тяжелых к легким, проявлению минимума по европию или его отсутствию, что может предлагаться как типохимический признак первого порядка по отношению апатитов, образованных в комплексах различных формаций и возрастов.

Апатиты становятся богаче РЗЭ от древних к молодым комплексам, что подтверждает общую тенденцию [24] коэффициент фракционирования нормированных по хондритам РЗЭ (Ce_N/Yb_N – отношение) увеличивается как для интрузивных (от 34 до 105), так и для метасоматических разновидностей (от 3 до 44). Кривые распределения РЗЭ в первичных апатитах серых гнейсов (рис. 4а) имеют относительно плавный характер с четким фракционированием РЗЭ ($Ce_N/Yb_N = 13-37$), европиевый минимум слабый или практически отсутствует. Кривые распределения (рис. 4б) характерны для метасоматических апатитов в серых гнейсах. Суммарное содержание также низкое, коэффициент фракционирования РЗЭ 3 – 7. В этих апатитах содержание стронция невысокое или практически не превышает порога чувствительности анализа. Далее (рис. 3 в) одна кривая с относительно высоким содержанием РЗЭ и отношением фракционирования, равным 105, представляет апатит, сосуществующий с

интрузивным кальцитом. Другие апатиты метасоматические. Кривые наиболее молодых апатитов показаны на рис 3 г, где магматический апатит определяется самым высоким содержанием РЗЭ, фракционным отношением 88 и отрицательной европиевой аномалией. Две следующие кривые, для которых характерно отсутствие европиевого минимума, отражают поведение апатитов метасоматического происхождения.

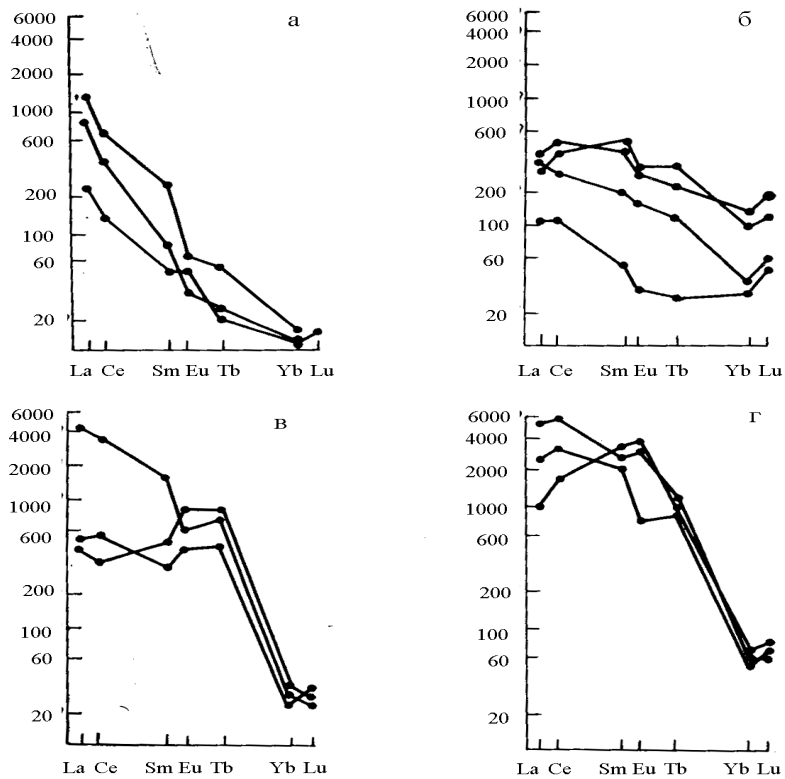


Рис. 3. Распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в образцах апатита (данные нормированы по хондритам):
а – магматического из серогнейсового комплекса Ондозерского блока; б – метасоматического из серогнейсового комплекса Ондозерского блока; в – Тикшеозерской группы массивов; г – Элисенваары

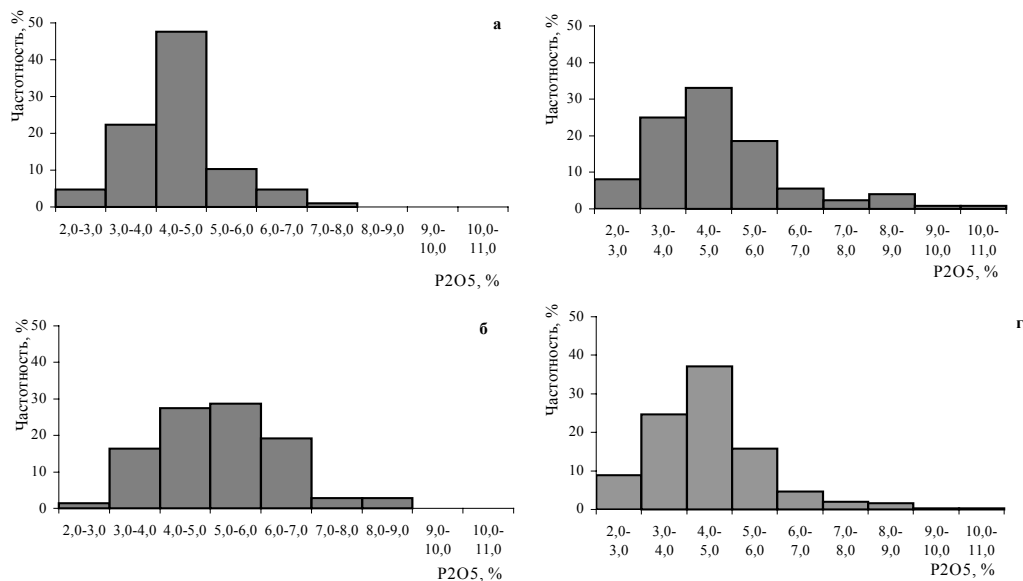


Рис. 4. Гистограммы распределения содержаний P_2O_5 в апатитонесных карбонатах (месторождение Тикшеозеро):

а – профиль 24; б – профиль 30; в – профиль 18; г – весь массив

Относительно апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского щелочного массива установлены вариации главных компонентов P_2O_5 , CaO и MgO, которые отвечают составам кальцитовых карбонатитов – основного типа комплексного минерального сырья. На некоторых горизонтах значения меняются резко за счет доломитовой разновидности карбонатитов. На гистограммах распределения содержаний P_2O_5 (рис. 4) показаны области небольших вариаций содержаний от 2 до 6%.

Отдельные значения объединены в классы, границы которых округлены. По некоторым пробам получены по содержанию P_2O_5 аномально высокие значения (менее 1.0% проб от общего количества) и – слишком низкие (около 3%), что связано с количественным соотношением апатита с темноцветными и силикатными минералами.

По общим вариациям значений $\delta^{13}C$ и $\delta^{18}O$ в карбонатитах принимается гипабиссальная природа массива [25]. Высокотемпературные карбонатиты Тикшеозерского массива характеризуются изотопным составом углерода, типичным для гипабиссальных фаций глубинности. Более низкотемпературные наложенные процессы приводят в основном к увеличению значений $\delta^{18}O$ (доломит-кальцитовый карбонатит).

Доказательством существования высокотемпературных и глубинных кальцитовых карбонатитов является распределение по разрезам скважин содержаний в карбонатитах CaO, MgO и P_2O_5 , что согласуется с распределением значений изотопного состава углерода по профилям 18, 24 и 30.

Исследования на обогатимость карбонатитов Тикшеозерского массива с учетом геолого-минералогических факторов показали, что к оптимальному варианту следует относить применение методов флотации и магнитной сепарации [26, 27, 28]. Получены следующие характеристики концентрата: карбонатный модуль CaO/ P_2O_5 – 7, извлечение P_2O_5 59.6 – 65.5% при содержании P_2O_5 в концентрате 38.3%. Разделение флотационной пульпы на мелкую и крупную часть повышает существенно технологические показатели. Попутный продукт – кальцитовый концентрат с содержанием CaO до 52.0% при извлечении 54 – 62%. В Карелии это самое крупное скопление апатита в природном виде. Апатитовые и кальцитовые концентраты относятся к высококачественным продуктам.

Выводы:

Для промышленных минералов предлагается рассматривать два порядка типоморфных признаков, позволяющих более обоснованно предсказывать поведение минералов в технологических процессах. Детальные исследования промышленных минералов из ряда месторождений и проявлений показали важность выявления типоморфных признаков метаморфических и магматических минералов.

Разработаны геолого-минералогические основы для создания технологических схем обогащения (кварц, апатит, кианит и целый ряд других минералов) и установлено влияние типоморфных свойств на показатели переработки конкретных промышленных минералов Карелии.

Выявленные на стадии лабораторных исследований минералогические особенности полезных ископаемых различных генотипов являются основой для выбора оптимальных вариантов рудоподготовки и обогащения промышленных минералов Карелии.

На конкретных примерах месторождений кианита и апатита показаны особенности влияния геолого-минералогических факторов на образование природных типов руд.

Благодаря проведенным комплексным исследованиям разных природных типов промышленных минералов Карелии показана возможность их технологической переработки, включая комбинированные схемы и специальные методы обогащения, которые позволяют более полно использовать промышленные минералы и помогают на практике решать важные технологические задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. – СПб: Наука, 1997. – 592 с.
2. Технологическая минералогия железных руд / Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. – Л.: Наука, 1980. – 304 с.
3. *Иванов О.П., Кушпаренко Ю.С., Маришкова Н.К.* Технологическая минералогия оловянных руд. – Л.: Наука, 1989. – 207 с.
4. *Ревнивец В.И.* Обогащение полевых шпатов и кварца. – М.: Недра, 1970. – 129 с.
5. *Дудкин О.Б.* Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. – Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. – 134 с.
6. *Бискэ Н.С.* Влияние регионального метаморфизма на технологические свойства графитовых пород // Технологическая минералогия важнейших промышленных типов месторождений. – Л.: Наука, 1987. С. 183-188
7. *Кулмала Т.К., Савицкий А.И., Сканниция Л.С., Щипцов В.В.* Новое геолого-технологическое изучение ильменитовых руд участка Суриваара, Ельтозерский массив // Вопросы геологии, магматизма и метаморфизма докембрия Карелии – Петрозаводск: Кар НЦ РАН, 1994. С. 70-74
8. Перспективы развития ресурсосберегающей и экологически чистой технологии обогащения калий-полевошпатового сырья Кольского полуострова и Карелии / *Литвинцев Э.Г., Мокроусов В.А., Зверев В.В.* и др. // Комплексное освоение минеральных ресурсов Севера и Северо-Запада СССР. – Петрозаводск, 1990. С. 214-217
9. Хизоварское кианитовое поле (Северная Карелия) / *Щипцов В.В., Сканниция Л.С. и др.* Петрозаводск, 1988. 105 с.

10. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. -М.: Наука, 1982. -104 с., 1987
11. Жариков В.А., Омеляненко. Классификация метасоматитов //Метасоматизм и рудообразование. – М., 1978. С. 9-28
12. Казыцын Ю.В. Метасоматизм в земной коре. – Л.: Наука, 1979. – 208 с.
13. Жданов В.А, Рундквист Д.В., Басков Е.А. Опыт систематики региональных метасоматитов и их рядов. Зап. ВМО. 1987. № 4, ч. 116. С. 408-416
14. Коржинский Д.С. Очерк метасоматических процессов //Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., 1955. С. 335-456
15. Глебовицкий В.А., Бушмин С.А. Послемигматитовый метасоматоз. – Л., 1983. – 127 с.
16. Гродницкий Л.Л. Гранитные пегматиты Балтийского щита. – Л.: Наука, 1982. – 294 с.
17. Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О. Происхождение алмазов и перспективы алмазоносности восточной части Балтийского щита. – Апатиты: Изд-во Кол НЦ РАН, 1995. – 144 с.
18. Щипцов В.В., Цюнь О.В., Желдаков Ю.А. Распределение U-Th-Pb и редкометалльных элементов в апатитах Карелии // Минералогический журнал, 1991, т.13, № 4. С.92-98
19. Edu G.H. Abundance and distribution of the rare-earth and ittrium in the rocks and minerals of the Oka carbonate complex // Geochim et Cosmochim / Acta. 1975. V. 75, № 1. P. 81-85
20. Самойлов В.С. Генетические типы и фации карбонатитов. // Метасоматизм и рудообразование. – М.: Наука, 1974. С. 196-204
21. Бархатов А.В., Скамницкая Л.С. Технологическая оценка обогатимости апатитовых руд Райвимажского, Койвимажского щелочного массива (западное Приладожье). // Геология и полезные ископаемые Карелии: – Петрозаводск, Кар НЦ РАН, 1980. С. 46-48
22. Технологические исследования карбонатитов Тикшезерского массива/ Бархатов А.В., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П. и др.// Минеральное сырье Лоухского района. – Петрозаводск, 1991. С.20-35.р.

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА

Р.В.Галиулин

Институт кристаллографии РАН

Введение. Кристаллографическая картина мира

Среди всех естественных объектов однозначной самосборкой обладают только кристаллы. По этой причине кристаллография не обобщаема. На ее основе возможно построить свою, кристаллографическую картину мира [1], альтернативную физическим картинам. 7-ой том Фейнмановских лекций по физике начинается со следующей мысли: «Если атомы где-то разместились так, что их расположения отвечают самой низкой энергии, то в другом месте атомы создадут такое же расположение. Поэтому в твердом веществе расположение атомов повторяется». Если это рассуждение Фейнмана уточнить теоремой М.И.Штогринна [5], то рассматриваемое расположение атомов будет кристаллической структурой. Обратим внимание на то, что минимум энергии в данном случае однозначно связывается с кристаллическими структурами, т.е. с правильными системами атомов. Для возникновения кристаллических структур достаточно учитывать только фиксированное число кратчайших химических связей [6]. «Кристаллография – часть химии» как гениально отметил Фридрих Энгельс. Любой ее шаг реально ощутим, поскольку связан с понятием правильности.

«Человечество всегда и во всем ищет правильности» – так начал свою самую первую рукопись гений Российской науки Е.С.Федоров (1853-1919) [7]. Поэтому уже в школьном образовании должен первенствовать кристалл, который своим видом доказывает правильность окружающего мира. Правильные многогранники – это математические абстракции, приучающие к правильному мышлению. Это единственный путь для изучения дискретного мира.

Современные идеи дискретного мира сформировали Федоров и французский гений Анри Пуанкаре (1854-1912), вдохнувший жизнь в геометрию Бояи-Лобачевского (Фуксовы группы, группы Лоренца [8, 9]). Кристаллография – наука о правильностях, что делает ее похожей на искусство. Взгляд на любую проблему с точки зрения правильности всегда открывает в ней новые перспективы. Ниже будет представлен кристаллографический взгляд на таблицу Менделеева, идея которого принадлежит Федорову. В виде рукописи он ее представил Д.И.Менделееву в 1880 году. Но Менделеев не обратил должного внимания на эту рукопись, и она была напечатана только через 75 лет [7]. В настоящее время существует мнение, что физическая суть таблицы Менделеева может быть выявлена только с помощью Квантовой механики [10]. Но тщательное изучение вышеупомянутой рукописи Федорова привело автора данной работы к мысли, что Федоров уже готов был к открытию этой сути. Только невозможность провести ряд экспериментов помешала Федорову заявить об открытии им электрона [11]. А суть его уже была ухвачена [7] в 1880 году, за 17 лет до соответствующей работы Дж. Дж.Томсона.

1. Правильные системы точек

Кристаллография в самом абстрактном представлении – это наука о правильных системах точек.

Определение 1.1. Система точек называется правильной, если каждая точка системы окружена одинаково всеми другими ее точками.

Лемма 1.1. Правильные системы точек могут быть только в пространствах постоянной кривизны: евклидовом (кривизна равна нулю), сферическом (кривизна положительная), гиперболическом (кривизна отрицательная).

С каждой правильностью связан свой закон сохранения [12]. Правильным атомным расположениям соответствует закон одинаковости атомов [13].

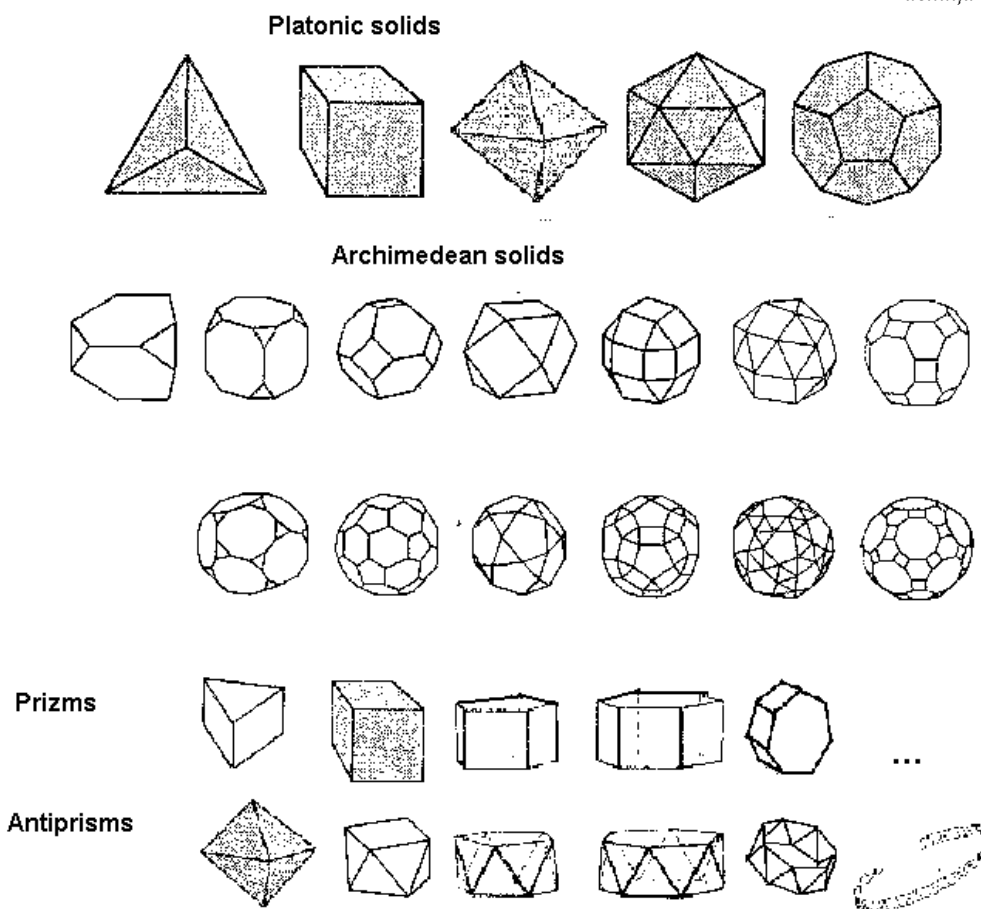
Лемма 1.2. Только в кристалле атомы могут быть абсолютно неразличимыми.

2. Сферические правильные системы

Лемма 2.1. Одномерные сферические правильные системы исчерпываются правильными и полуправильными многоугольниками.

Лемма 2.2. Двумерные сферические правильные системы исчерпываются совокупностями вершин тел Платона, тел Архимеда и двумя бесконечными сериями призм и антипризм (правильные и полуправильные изогоны [1]) (табл.1).

Таблица 1



Теорема 2.1. На сфере устойчивы только правильные конфигурации электронов (изогоны).

Квазикристаллические расположения кулоновских зарядов, полученные прямыми расчетами от одного до ста [14] (рис. 1), для электронов неустойчивы, поскольку нигде не встречены.

3. Простейшая Таблица Менделеева

Если первые 120 элементов Таблицы Менделеева выстроить в один ряд в порядке возрастания их атомных номеров, то легко заметить следующую особенность: щелочной и щелочноземельный элементы в этом ряду располагаются попарно. Эти пары разбивают исходный ряд на отрезки длиной в 2, 2, 8, 8, 18, 18, 32, 32 элемента. Выпишем отрезки одинаковой длины друг под другом в порядке возрастания атомных номеров. Так получаются четыре прямоугольные таблицы: 2×8 , 6×6 , 10×4 , 14×2 . Эти таблицы однозначно объединяются в Таблицу Менделеева (табл. 2):

го порядка, у d-элементов – ось 5-го порядка, у f-элементов – ось 7-го порядка. Вследствие осей 5-го и 7-го порядков, d- и f-элементы не могут прямо входить в кристаллы. Они должны перестроить свои электронные оболочки. С этим и связана их рассеянность и редкость.

Теорема 5.1. Каждый атом из первых 120 элементов состоит из бесконечного числа уровней с числом вакансий для электронов 2, 6, 10, 14.

Теорема Т.Ф.Веремейчик. Гибридизация 6s и 6d орбиталей у атомов ртути дает правильную икосаэдрическую орбиталь.

Икосаэдр не образует правильного разбиения евклидова пространства, он не стереоэдр. Это в какой-то степени объясняет жидкое состояние ртути при комнатных условиях.

6. Ридберговские атомы

Определение 6.1. Электронной формулой химического элемента называется последовательное (по Таблице Менделеева) перечисление заполненных и частично заполненных электронных орбиталей [16].

Определение 6.2. Атомы с пустыми промежуточными орбиталями называются Ридберговскими [17].

В космическом вакууме Ридберговские атомы могут быть сколь угодно больших размеров. Нуклонные звезды, возможно, и есть скопления ядер ридберговских атомов, электронные оболочки которых разбросаны по всей галактике. Но они возможны и при сверхвысоких давлениях, способствующих гибридизации электронных орбиталей, и в пределе превращающих их в антипризмы. Для описания возможных состояний атомов только на земном шаре нужно, по крайней мере, семь разных Таблиц Менделеева, которые будут принципиально отличаться друг от друга электронными формулами химических элементов: для атмосферы, для гидросферы, для литосферы, для верхней мантии, для нижней мантии, для жидкой части земного ядра, для твердой части Земного ядра. По этой причине в Таблицу Менделеева не следует вводить электронные формулы.

Таблица Менделеева представляет общую структуру каждого химического элемента, а не ее перестройки в зависимости от конкретных ситуаций.

7. Евклидовы правильные системы

Выше были рассмотрены правильные системы электронов на сфере, что является сутью Таблицы Менделеева. Но ее законы распространяются и на атомные структуры ее элементов.

Определение 7.1. Полная совокупность преобразований симметрии, переводящих правильную систему в себя, называется Федоровской группой.

Федоровская группа имеет и другие, альтернативные определения.

Определение 7.2. Федоровской группой называется дискретная группа с конечной независимой областью. Ниже будут существенно использованы оба эти определения.

Все различные правильные системы точек евклидовых пространств любых размерностей порождаются Федоровскими группами. Федоровские группы – единственный критерий, отличающий кристаллические атомные образования от некристаллических.

Имеется только два типа правильных систем на прямой: решетка и бирешетка. На плоскости имеется 17 разных Федоровских групп, которые порождают 72 различных позиций Уайкова двумерных правильных систем (табл.3). Вывод этих групп начал К.Жордан, закончил Е.С.Федоров. Но все они использовались в живописи арабами [18,19]. В настоящее время эти 17 групп уже внедряются в школьные учебники геометрии [20, рис. 289], а в Internet имеется программа, составленная геометрами Будапештского политехнического университета, рисующая правильные узоры, генерирующая все правильные системы точек на евклидовой плоскости и соответствующие им планигоны [21]. Аналогично, на плоскости Лобачевского правильное разбиение образуют правильные многоугольники любого порядка.

В случае 3-мерного пространства имеется 219 абстрактно различных групп, которые порождают 1730 различных позиций Уайкова [22].

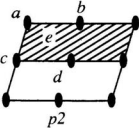
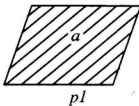
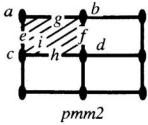
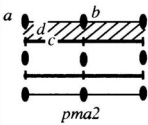
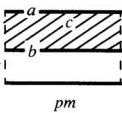
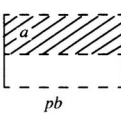
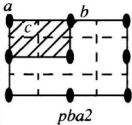
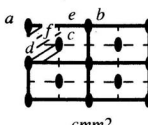
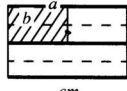
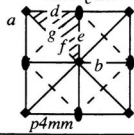
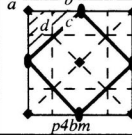
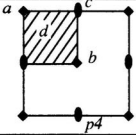
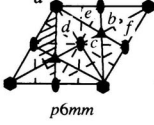
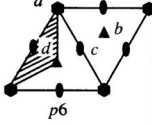
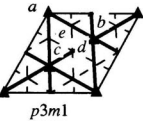
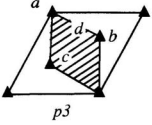
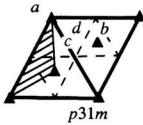
8. Правильные структуры

При объединении атомов в правильную структуру работает только одно правило: атом так окружает себя другими атомами, чтобы все электронные оболочки с общими электронными парами соответствовали многогранникам, содержащимся в вышеприведенной таблице, либо были s-оболочками. Геометрически это означает, что пространство разбивается на вышеприведенные многогранники так, что их вершины образуют правильную систему точек. Существует 28 таких разбиений (разбиения Андреини, табл.4).

9. Кристаллография электрического тока

По вершинам разбиений Андреини и перемещаются электроны, т.е. течет электрический ток [23]. А вследствие принципа неопределенности, они могут перескакивать в соседние позиции.

Таблица 3

Голоэдри		Гемиздри			Тетартоздри
симморфные	несимморфные	осевые	планальные симморфные	планальная несимморфная	
					
					
					
					
					
					
					

Теорема 8.1. В двумерном случае все комбинаторно различные правильные сетки представлены в таблице 5.

Они были найдены выдающимся кристаллографом А.В.Шубниковым (1887-1970) [24].

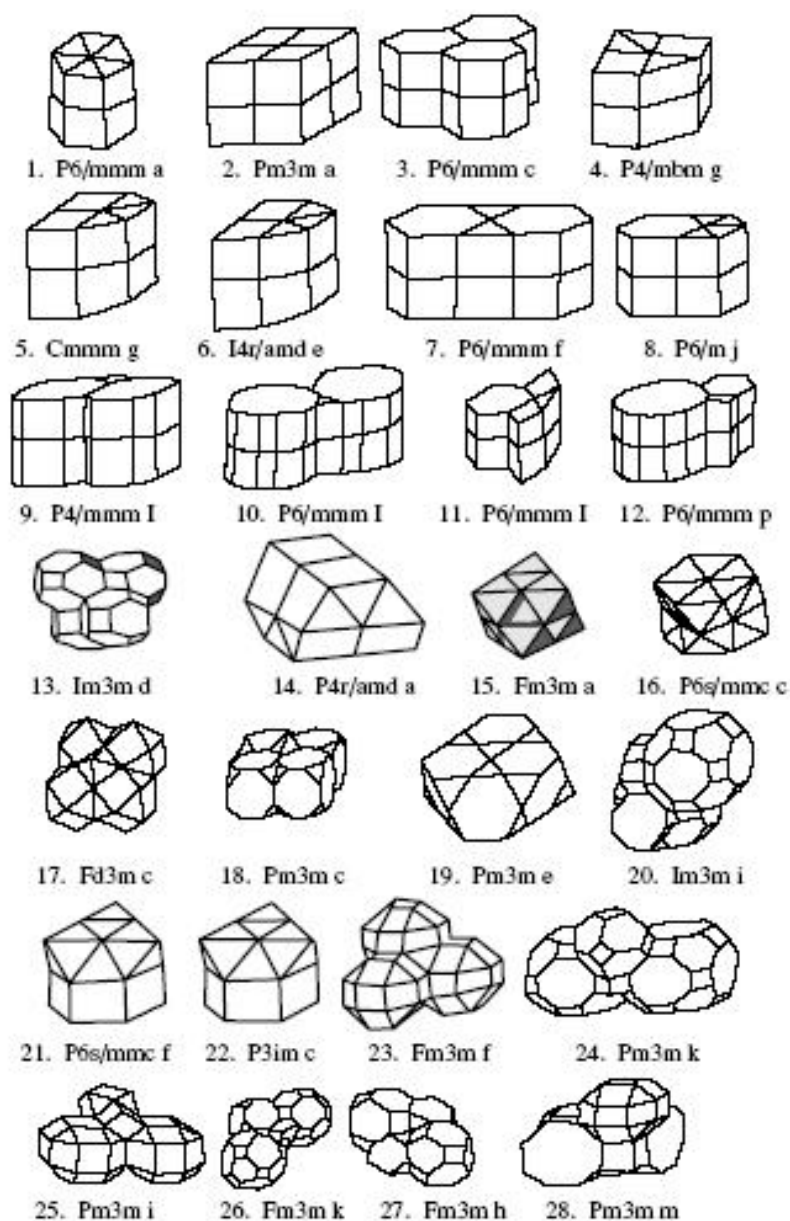
10. Что такое нанокристалл?

Каждый атом может быть представлен независимыми областями кристаллических структур, в которых он может закристаллизоваться. Склейка этой независимой области по эквивалентным точкам границы приводит к представлению отдельных атомов и их конечных совокупностей (кластеров) компактными локально-евклидовыми многообразиями [25]. Когда объект замыкается в такое многообразие, он теряет связь со всем окружающим миром, становится самодостаточным, не имеет поверхности, т.е. он в каком-то смысле исчезает. Таковы, например, заполненные атомные орбитали, которые не взаимодействуют между собой. Таковыми являются нанокристаллы. С этим связана их сверхтекучесть, сверхпроводимость. Заметим, что независимая область группы выбирается многими различными способами, но многообразие по ней восстанавливается однозначно.

Физическая осуществимость такой склейки уже доказана экспериментально. В двумерном случае это будут: тор, лента Мебиуса, бутылка Клейна и их аналоги с особыми точками.

Путем образования нанокристаллов удовлетворяется стремление атомов быть правильными и в конечных совокупностях. Линейные цепочки атомов (одномерные линейные кристаллы) всегда стараются развалиться на кольца (одномерные сферические кристаллы). Так, например, образуются сажи из карбинов.

Таблица 4



11. Вселенная как нанокристалл

В последнее время склоняются к мысли, что Вселенная ограничена и ее диаметр составляет 75 миллиардов световых лет. Сама же Вселенная представляет компактное локально-евклидовое многообразие, построенное на додекаэдре, т.е. похожа на d -атомы. Таким образом, **Вселенная и атом топологически сходны**.

Получается, что Таблица Менделеева есть одновременно и классификация всех различных типов Вселенных. В этом и состоит ее фундаментальная значимость.

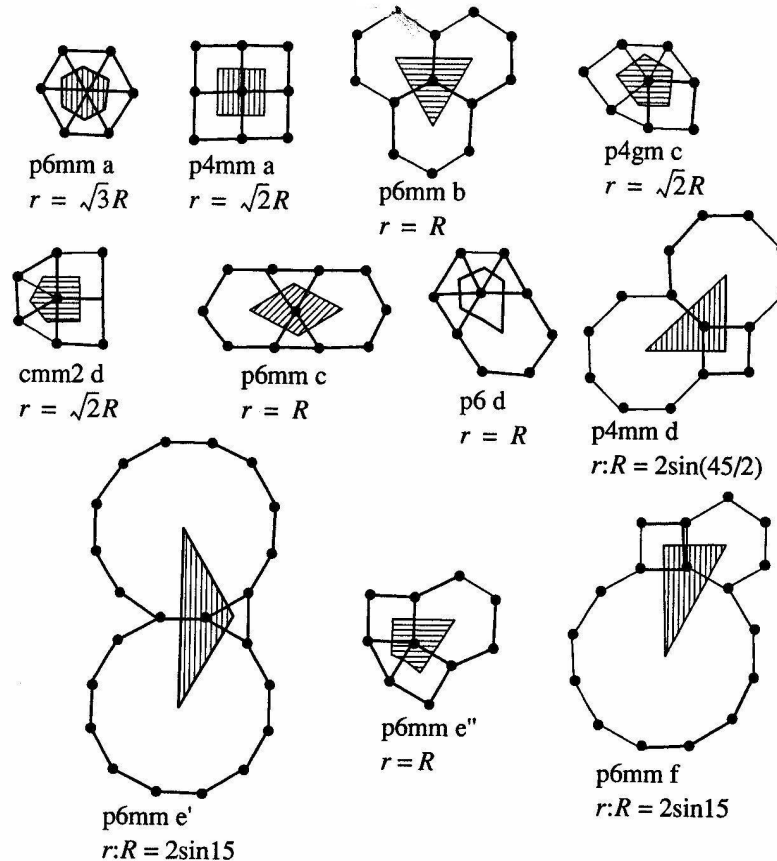
Следует отметить, что Вселенная в виде многообразия, построенного на додекаэдре, впервые была предсказана Пуанкаре. Возможно, эта мысль, как и ряд других (Фуксовы группы, группы Лоренца и др.), появились у Пуанкаре благодаря солидной кристаллографической подготовке.

Нанокристаллами являются также атомы с заполненными электронными орбиталями, включая и Ридберговские атомы, фуллерены, слоистые фуллерены (онионы). Так на микроуровне осуществляется стремление материи к кристаллическому состоянию. Это стремление материи по сути дела определяет новую физику – в открытых системах материя стремится не к хаосу, а к идеальному порядку, который может быть воплощен только в кристаллах (евклидовых, сферических, гиперболических). Зарождение кристалла – это стремление частиц образовать нанокристалл. Рост кристалла – это стремление кристалла скомпенсировать свои связи на поверхности. Как было отмечено А.А.Власовым, кристаллизация меняет кривизну пространства [26].

12. Атомное ядро. Симметрия атомного ядра должна совпадать с симметрией электронных орбиталей. Но это совсем не означает, что протоны располагаются по таким же правильным системам, что и электроны. Для изучения этого вопроса надо строить модели устойчивых изотопов (число нейтронов для каждого устойчивого изотопа и процентное содержание этого изотопа). Максимум числа устойчивых изотопов приходится на олово (10), ксенон (9) и кадмий (8).

Обратим также внимание на следующий факт: 23 элемента имеют только один устойчивый изотоп и в 21-м из них число протонов нечетно. Это, возможно, связано с тем обстоятельством, что при нечетном числе протонов имеется возможность одному из протонов располагаться в центре ядра.

Таблица 5



13. Все должно превратиться в кристаллы

Выдающийся минералог, организатор наук и производств (он открыл и довел до добычи крупнейшее в мире месторождение апатитов в Хибинах), академик А.Е.Ферсман сказал на похоронах Федорова: «Все, что не кристаллично, не прочно и должно превратиться в кристаллы. Кристаллы, это то идеальное состояние вещества, тот глубокий внутренний порядок, к которому стремится природа» [27]. Поэтому кристаллизация и является движущей силой всех космических процессов, начиная от движения электронов.

Как это следует из Таблицы Менделеева, устойчивому состоянию электронов на сфере соответствуют их расположения по вершинам правильных и полуправильных изогонов. Ими наглядно и представляются электронные орбитали. Такое представление хорошо согласуется с волной де Бройля, пучности которой совпадают с вершинами правильных призм и антипризм.

При низшем энергетическом состоянии 120 первых элементов бесконечной Таблицы Менделеева по своей симметрии распадаются на 4 типа (элементы, заключенные между жирными столбцами вышеприведенной Таблицы 2): отрезок (как одномерная антипризма), тригональная антипризма, пентагональная антипризма и гептагональная антипризма.

14. Земля тоже идет по пути кристаллизации

Образование галактик, звездных систем, формирование планет и месторождений полезных ископаемых на этих планетах – звенья этого глобального процесса.

Земля в целом тоже может быть рассмотрена как кристалл, возникший при распаде газопылевого облака в результате нелинейного движения его частиц по законам фрактала Мандельброта [28].

Земное ядро – глобальный аттрактор этого фрактала и к нему с разной скоростью стремятся все частицы. Гравитация только одна из составляющих этого нелинейного процесса, работавшая эффективно на первых этапах формирования Земли. Когда Земля сконденсировалась до жидкого состояния [29], гравитация начала уступать место диффузии. Состав ядра менялся в процессе развития Земли. Сначала ядро состояло из тяжелых элементов: актинидов, платины, золота, железа. При превалировании трех последних элементов ядро приобрело икосаэдрическую симметрию (собственную симметрию атомов d-элементов в их наиболее устойчивом состоянии, см. ниже). Затем гравитацию сменила диффузия, при которой резко увеличилось процентное содержание атомов углерода, достигших земного ядра.

Поскольку при достижении атомами аттрактора, он для них становится репеллером (точкой отталкивания), то достигшие аттрактора атомы рассеиваются. В ядре земли задерживаются только те элементы, которые могут образовать более прочные связи между собой. Так, ядро обогащается алмазоподобными модификациями углеродных структур (алмаз, лонсдейлит и др.).

Рассеянные элементы, двигаясь по нелинейным законам, в свою очередь тоже образуют фрактальные структуры. Крупные месторождения, связанные с этими структурами, вследствие масштабной инвариантности фрактала Манделброта, тоже могут иметь манделбротоподобную структуру. Рассказы о том, что по форме самородка опытные старатели определяли контуры всего месторождения, могут оказаться и математически обоснованными.

Каждый аттрактор потенциально является центром кристаллизации, и одинаковые атомы в одинаковом энергетическом состоянии с незаполненными валентными оболочками имеют возможность образовать кристалл. Не кристаллизующиеся в данных условиях атомы (например, водород), продувая земное ядро, вследствие тех же нелинейных движений, неоднократно возвращаются к нему. В ядре земли водород в присутствии железа соединяется с углеродом, образуя простейшие углеводороды [30], которые в земной коре поедаются простейшими организмами. Так объединяются концепции органического и неорганического (предложенного Д.И. Менделеевым) происхождения нефти.

Идеальным местом для скопления нефти и газа являются купола из доломитовой муки, образование которой можно объяснить чисто кристаллографически. При доломитизации известняков последние (при определенном соотношении Са и Mg в структуре) рассыпаются в мелкий порошок, поскольку кальциевые сетки в структуре кальцита деформируются в форму обезьяньего седла. Последнее не может быть вложено в трехмерное евклидово пространство, и возникающие при этом напряжения раскалывают его на нанокристаллы. При классификации геологических структур следует придерживаться классификации поверхностей постоянной кривизны: евклидовы, сферические и гиперболические. Сетка крупнейших разломов Земной коры совпадает с реберной сеткой икосододекаэдра [31, 32]. Поскольку группа симметрии последнего имеет подгруппу $m\bar{3}$ (кубическая гемиздрия), то Землю относительно некоторых свойств можно рассматривать и как центрально-гемиздрический куб [33] (принцип Неймана).

15. Принцип Неймана – симметрия любого физического свойства кристалла не может быть ниже симметрии совокупности ростовых форм кристалла, включая и морфологию граней.

Если при росте появилась какая-либо грань, то появятся и все эквивалентные ей грани, т.е. все грани соответствующей простой формы, поскольку в кристаллической структуре они абсолютно неразличимы. Поэтому физические свойства кристалла будут всегда одинаковыми в направлениях, перпендикулярных граням этой простой формы. Максимальной симметрией обладает *оптическая индикатриса* – поверхность, составленная из концов векторов, задающих скорость распространения света в соответствующих этим векторам направлениях.

Под направлением, соответствующим данному кристаллическому классу, будем понимать вектор, начало которого совпадает с особой точкой кристаллического класса. По связи вектора направления с обратным ему вектором, направления в кристаллах могут быть однозначно разделены на следующие 5 типов [34]:

особые – направления, совпадающие с собственными векторами;

полярные – обратный вектор не эквивалентен исходному;

крутильные – обратный вектор не эквивалентен исходному по преобразованиям 2-го рода;

аксиальные – обратный вектор не эквивалентен исходному по преобразованиям 1-го рода;

нейтральные – обратный вектор эквивалентен исходному как по преобразованиям 1-го рода, так и 2-го рода.

Кристаллы с особыми направлениями могут обладать пьезоэлектрическим эффектом (турмалин), с полярными направлениями – пьезоэлектрическим эффектом (кварц), с крутильными направлениями – вращать плоскость поляризации (киноварь), с аксиальными направлениями – обладать ферромагнитными свойствами. Ниже выписаны кристаллические классы с направлениями, обладающими одним из названных выше физических свойств (для трехмерных евклидовых кристаллов):

пироклассы – 1, 2, m, mm2, 4mm, 4, 6mm, 6, 3m, 3; *пъезоклассы* – 1,2,m,222,mm2,422,4mm,4i2m, 4,4i,622, 6mm, 6i2m,6, 6i,32,3m,3,4i3m,23;

гироклассы – 1,2,m,222,mm2,422,4mm,4i2m,4,4i,622, 6mm,6,32,3m,3,432,23;

ферроклассы – $i, 1, 2/m, 2, m, 4/m, 4, 4i, 6/m, 6, 6i, 3$. Заметим теперь, что принцип Неймана основан только на кристаллических классах, т.е. эти эффекты могут иметь место и на не кристаллах. Например, древесина тоже может обладать пьезоэффектом. Сугубо кристаллические свойства основаны на Федоровских группах. Например, атомное вещество, обладающее максимальной теплопроводностью, состоит из атомов водорода, образующих алмазную структуру. Если же по алмазной структуре расположить позитроний («атом», ядром которого служит позитрон), то теплопроводность у такого вещества будет еще выше. Весьма возможно, что на Солнце есть такие кристаллы. По уравнению состояния плазмы А.А.Власова (1916-1976) ее частицы обладают дальнодействием, которое и приводит к их упорядочению [35].

16. Физический смысл элементов симметрии. Рассмотрим потенциальное поле сил. В этом поле каждой точке соответствует, с одной стороны, некоторое значение вектора силы f , действующей в этой точке, с другой стороны – некоторое значение потенциальной энергии U . Сила, действующая в данной точке, равна **градиенту** потенциальной энергии, взятому с обратным знаком. Если потенциальное поле обладает плоскостью симметрии или поворотом вокруг оси, то градиент точек, соответствующих элементам симметрии этих поворотов, лежит в этих элементах симметрии. Градиент особой точки инверсионной оси (собственное подпространство инверсионного поворота) равен нулю. Это следует из однозначности определения градиента [36]. Таким образом, градиент является движущей силой кристаллизации. С этим связан закон Вернадского о всюдности атомов.

Имеется 7 различных типов преобразований симметрии (табл.6).

Таблица 6

ТИПЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИММЕТРИИ				
Геометрическое представление	Название	Символ	Вектор переноса	Элемент симметрии
	Тождественное преобразование	$1, E$	0	Пространство
	Зеркальное отражение	m	0	Плоскость
	Поворот вокруг оси	$2\ 3\ 4\ 5\ 6\ \dots$	0	Прямая
	Инверсионный поворот	$i\ 3i\ 4i\ 5i\ 6i$	0	Точка
	Параллельный перенос	T	T	Пространство
	Скользящее отражение	$a\ b\ c\ n\ d$	t	Плоскость
	Винтовой поворот	$2s\ 3r\ 4r\ 4s$	t	Прямая

17. Биология

Генетический код зародился на гранях кристалла апатита [37]. Его можно рассматривать матрицей, на которой зарождается и развивается жизнь. Упаковка каждого типа клеток живого организма – правильная. Принцип симметрии не уничтожим и неизменен [38].

Ограниченность Вселенной упрощает и вопросы, связанные с возникновением Жизни. Орбитали ридберговских атомов, начиная с некоторого числа, могут быть только призмами и антипризмами с большим числом вершин.

Возможно, что в космическом вакууме они достигают космических размеров. При ограниченности размеров Вселенной имеется возможность создания любых химических соединений, в частности и тех, на которых основана Жизнь. Модели земного происхождения Жизни весьма маловероятны. Жизнь – это продукт всей Вселенной.

18. Триангуляция Делоне с веками только прирастать будет

Квантовая механика не в состоянии объяснить дискретный мир по той причине, что она решила для его исследования использовать непрерывную математику, непрерывную картину мира. Загнав электрон в дифференциальные уравнения, она неимоверно усложнила задачу, поскольку дискретность и правильность являются главными характеристиками квантованного мира. Поэтому как математическая модель описания квантового мира наиболее естественны системы Делоне [39]. Они были созданы Б.Н.Делоне для решения ряда фундаментальных кристаллографических задач [40, 41], но оказались главной концепцией современного естествознания, которую уже пора вводить в школьные учебники [42]. Триангуляция Делоне (однозначное построение графа Делоне для любой системы Делоне) уже стала основным методом вычислительной геометрии [43]. Она уже незаменима при моделировании роста кристаллов и даже некристаллических систем [44]. О триангуляции Делоне можно сказать так же, как Д.И.Менделеев сказал о своей Таблице: её значение с веками прирастать будет.

19. Не выпускайте из рук знамя чистой кристаллографии

Основанный на системах Делоне дискретный подход к описанию структуры Вселенной [45] позволяет охватить все ее иерархические уровни, начиная от элементарных частиц и кончая упаковкой сверхскоплений галактик. В самом общем виде системы Делоне представляют расположения центров молекул в идеальном газе, в наиболее вырожденном виде – идеальные кристаллические структуры. Все остальные состояния материи находятся в промежутке между двумя этими предельными состояниями. Полученную извне энергию система тратит на упорядочение. А идеальный порядок может быть только в кристаллических структурах. Поэтому открытые системы на любых иерархических уровнях стремятся к кристаллическому состоянию. С этим связано самосовершенствование кристаллов, эффект, далеко выходящий за границы кристаллографии.

«Не выпускайте из рук знамя чистой кристаллографии» – с таким лозунгом обратился А.В.Шубников к делегатам 7-го Международного конгресса кристаллографов (Москва, МГУ, 1966 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Галиулин Р.В. Кристаллографическая картина мира. УФН 2002, т. 172, в. 2. -. 229 с.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Т.5. Ч.1. НАУКА М. 1995.
3. Дискретная геометрия и геометрия чисел. Сборник статей, посвященных юбилею С.С.Рышкова. Труды Математического института имени В.А.Стеклова, 2002, т.239
4. Галиулин Р.В. Комбинаторно-симметричная классификация первых зон Бриллюэна. Кристаллография, 1984, т.29, в. 4. – С. 638-642
5. Штогрин М.И. Правильные разбиения пространств постоянной гауссовой кривизны и их приложения. Автореферат дисс. ... докт.физ.-матем.наук. М.: МИ РАН. 2000
6. Галиулин Р.В. Системы Делоне как основа геометрии дискретного мира. Журнал вычислительной математики и математической физики. 2003. Т.43. №6. – С.790-801.
7. Федоров Е.С. Попытка подвести атомные веса под один закон. (Рукопись, представленная Д.И.Менделееву в 1880 году; напечатана в сборнике статей «Кристаллография», вып. 3, Издательство Ленингр. Университета, 1955 г. – С. 85-96). А.Тяпкин, А.Шибанов. Пуанкаре. ЖЗЛ М. Молодая Гвардия, 1979 г.
8. Арнольд В.И. Недооцененный Пуанкаре. Успехи математических наук 2006 т.61 вып.1(367). – С.3-24
9. Буравихин В.А., Егоров В.А., Идлис Г.М. Биография электрона АГАР М. 1997, – 240 с.
10. Федоров Е.С. Императорская Петербургская Академия Наук. Научное наследство. Неизвестные и малоизвестные работы. НАУКА Л. 1991 – 172 с.
11. Фейнмановские лекции по физике, т.4. – С.471-492
12. Галиулин Р.В. Правильные системы. ПРИРОДА. 1991 12. – С. 20-36
13. Лифшиц А.М., Лозовик Ю.Е. Квазидвумерные кристаллические кластеры на сфере: метод топологического описания. Кристаллография, 2002, т.47, №2. – С. 214-223
14. Терновой А.Н. Новое в физике водорода. Геологический семинар Института геологии. Вып. 2. Петрозаводск 2005. – 20 с.

15. Ключковский В.М. Распределение атомных электронов и правило последовательного заполнения (n+1)- групп. М. Атомиздат 1968
16. Делоне Н.Б. Ридберговские атомы. Соросовский журнал, № 4, 1988. – С. 64 -70
17. Белов Н.В. Средневековая мавританская орнаментика в рамках групп симметрии. Кристаллография, 1956, том 1, в.5. – 612 с.
18. Mamedov Kh.S. Crystallographic patterns. Comp&Math with Appl. V.12I No 3-4, p.511-529
19. Александров А.Д., Вернер А.Л., Рыжик В.И. Геометрия для 8-9 классов. ПРОСВЕЩЕНИЕ 1996. – 416 с.
20. Делоне Б.Н. Теория планигонов. Известия АН СССР, 23 (1959 г.). – С. 365-386
21. International Tables for X-ray Crystallography. Birmingham 1952, 558 p.
22. Галиулин Р.В. Кристаллография электрического тока. // Тез. 5-я Национальная конференция по применению синхротронного излучения для исследования наноматериалов и наносистем. Москва. – С. 280
23. Шубников А.В. К вопросу о строении кристаллов. Изв. Имп. АН. Сер.6 т.10. – С. 755-779
24. Галиулин Р.В. Двумерные дискретные группы с конечной фундаментальной областью, их физический и гуманитарный смыслы. ЖВМ. 2005, т.45, № 8. –С.1331-1344
25. Кузьменков Л.С. Рост структур с сохранением их подобия (Теория А.А.Власова). В книге «Теория реального кристаллообразования», НАУКА, 1977. – С. 221-227
26. Ферсман А.Е. Е.С.Федоров и его роль в науке. Природа., 1920, № 1., – С. 13-15
27. Галиулин Р.В. Аксиоматика формирования месторождений кристаллических полезных ископаемых. Информационный сборник «Геологическое изучение и использование недр», вып.5. – С. 38-43
28. Шмидт О.Ю. Происхождение Земли и планет. ИАН, 1962. – 132с.
29. В.Кудрин. Интеграция органической и неорганической гипотез генезиса углеводородов. Теплоэнергетический комплекс, 2002, № 3, –44 с.
30. Гончаров Н.Ф., Макаров В.А., Морозов В.С.. Земля – большой кристалл? Химия и Жизнь. 1974 №3. – С. 34-38
31. Земля – большой кристалл? По материалам исследований Н.Ф.Гончарова, В.А.Макарова, В.С.Морозова. Изд-во ЗАХАРОВ 2005. – 224 с.
32. Федоров А.Е. Мировая история и глобальные геологические структуры (часть вторая). 13-й Научный семинар по нетрадиционным вопросам геологии (труды), 2005. – С. 353-500
33. Желудев И.С.. Простая симметричная модель мироздания. НАУКА 1996
34. Власов А.А. Теория многих частиц. ГИТТЛ М. 1950. – 348 с
35. Галиулин Р.В., Сигарев Р.В. Об устойчивости минералов с голоэдрическими федоровскими группами. Док. АН СССР, 1987, т.293, – С.99-100
36. Голубев С.Н. Минеральные кристаллы внутри организмов и их роль в происхождении жизни. Журнал общей биологии, № 6, 1987. – С. 784 – 806.
37. Болотов Б.В. Здоровый человек в нездоровом мире. ПИТЕР 2005. – 394 с.
38. Делоне Б.Н. Геометрия положительных квадратных форм. УМН, 1938
39. Delaunay B.N. Neue Darstellung der geometrischen kristallographie. Zs.f.Kristallogr., 1933, Bd. 84, S. 109-149
40. Галиулин Р.В. Системы Делоне. Кристаллография, 1980
41. Галиулин Р.В. Каким должен быть современный учебник геометрии для школьников. Матэматыка. Минск, 2006, № 1. – С.3-5
42. Агештейн М.Э., Мигдал А.А. Как увидеть невидимое. Эксперимент на дисплее. Первые шаги вычислительной физики. Москва, Наука, 1989, Серия «Кибернетика». – С.141-170
43. Медведев Н.Н. Метод Вороного-Делоне в исследовании структуры некристаллических систем. Новосибирск 2000. – 214 с.
44. Ivanenko D.D., Galiulin R.V. Quasicrystal model of the universe. Protvino, 1995, p.180

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ СРАСТАНИЙ В ПОРОДАХ И РУДАХ

Ю.Л. Войтеховский

Геологический институт Кольского НЦ РАН

Введение

Изредка жизнь дарит нам встречи с людьми выдающимися, но мы обычно осознаем это слишком поздно. Остается лишь вспоминать давние события, пытаясь извлечь уроки. Пользуясь случаем, хочу вспомнить два эпизода из многолетнего общения с д.г.-м.н., проф. В.М. Изoitко (см. другую статью автора в настоящем сборнике). Оба они относятся к последнему десятилетию. Пройдя годичную стажировку в Центре геостатистики при Высшей национальной горной школе Парижа в рамках обучения в докторантуре при Институте геологии Коми НЦ УрО РАН, автор был полон идей о применении статистических методов к описанию структур горных пород и руд. Одна за другой появлялись статьи, отсылаемые в «Обогащение руд», где и попадали на рецензию к Виктории Михайловне. Редколлегия научных журналов не любит статей с продолжениями. Но тут чудесным образом серия получилась [1-10], хотя каждую статью приходилось отстаивать в переписке. В итоге редколлекцией была объявлена [6] и в феврале 1998 г. на техническом совете АОЗТ «Меха-

нобр Инжиниринг» состоялась [9] публичная дискуссия. Напомню её основные тезисы, не потерявшие актуальности.

Тезис I. Минералогии (в т.ч. технологической) нужна теоретическая концепция кристаллической горной породы (руды) как пространства

Долгое время считалось, что Земля плоская, оказалось – сферическая. С современной точки зрения, эти две (не столько старая и новая, сколько локальная и глобальная) истины согласуются в известном топологическом утверждении, что сфера локально евклидова. Воспользовавшись этой весьма отдалённой аналогией, поясним первый тезис следующим образом. Минералоги (а также петрографы и вообще все геологи) считают, что кристаллические горные породы суть большие агрегаты минеральных индивидов (зерен, кристаллов), в чём всякий может убедиться невооружённым глазом или с помощью микроскопа. Автор полагает, что эта истина – как раз из разряда локальных. Но в чём тогда состоит глобальная истина?

Прежде чем дать ответ на этот вопрос, сделаем одно замечание. Как представляется, отсутствие теории кристаллической горной породы (руды) гносеологически связано с неуверенностью минералогов в возможностях абстрагирования. Именно поэтому в данной области все теории являются лишь эмпирическими обобщениями. В качестве образца решительного абстрагирования напомним определение гранулометрии по Ж. Матерону. «Пусть E – некоторое множество и $\mathfrak{Z} \subset \mathfrak{R}(E)$. Гранулометрией на $\mathfrak{Z}$ называется всякое однопараметрическое семейство ψ_λ , где $\lambda \geq 0$, отображений класса $\mathfrak{Z}$ в себя, удовлетворяющее следующим условиям: (1) $\psi_\lambda(A) \subset A$ для любых $\lambda \geq 0$ и $A \in \mathfrak{Z}$; (2) $A, B \in \mathfrak{Z}, A \subset B \Rightarrow \psi_\lambda(A) \subset \psi_\lambda(B)$ для любых $\lambda \geq 0$; (3) $\lambda \geq \mu \geq 0 \Rightarrow \psi_\lambda(A) \subset \psi_\mu(A)$ для любых $A \in \mathfrak{Z}$; (4) $\psi_\lambda \times \psi_\mu = \psi_\mu \times \psi_\lambda = \psi_{\sup(\lambda, \mu)}$ для любых $\lambda, \mu \geq 0$ » [6].

На первый взгляд – ничего общего с привычным гранулометрическим анализом. Но если принять, что E – просеиваемый материал, $\mathfrak{Z}$ – совокупность навесок из их мыслимого разнообразия $\mathfrak{R}(E)$, $\psi_\lambda(A)$ – остаток на сите с размером ячеек λ после просеивания навески A , знак $\times$ показывает последовательное просеивание в различных ситах, то всё встаёт на свои места. Легко видеть, что $(\psi_\lambda \times \psi_\mu) \times \psi_\varphi = \psi_\lambda \times (\psi_\mu \times \psi_\varphi) = \psi_{\sup(\lambda, \mu, \varphi)}$ и $\psi_\lambda \times \psi_\lambda = \psi_\lambda$. То есть, мыслимые для данной навески ситования образуют ассоциативный и коммутативный группоид (не являющийся полугруппой), в котором каждый элемент идемпотентен. Рутинная процедура ситования привела нас к основаниям современной алгебры! Но зачем? Затем, что подобные определения лежат в основании математической морфологии, применяемой в автоматических анализаторах структур металлов и сплавов. Согласитесь, полезная вещь...

Можно ли предложить нечто похожее для кристаллической горной породы? Давняя идея автора состоит в том, чтобы понять её как пространство с набором фундаментальных свойств, следующих из неотъемлемых межэлементных отношений. Первый шаг на этом пути – определение горной породы как топологического пространства [7]. Класс объектов $\mathfrak{R}$ называется топологическим пространством, если он может быть представлен как объединение некоторого семейства $\mathfrak{Z}$ своих подмножеств, замкнутого относительно объединения любого числа и пересечения любых двух из них. Семейство $\mathfrak{Z}$ (включая пустое множество) называется топологией $\mathfrak{R}$. Если существует такое семейство $\mathfrak{N}$ множеств, что каждое множество из $\mathfrak{Z}$ есть объединение некоторых множеств из $\mathfrak{N}$, то последнее называется базой $\mathfrak{R}$.

На первый взгляд – сложно. Но заметим, что всякое множество допускает две предельные топологии: (1) тривиальную – $\mathfrak{Z}$ состоит из пустого множества и самого $\mathfrak{R}$, и (2) дискретную – $\mathfrak{Z}$ содержит любое подмножество $\mathfrak{R}$. Применительно к кристаллической горной породе это означает, что $\mathfrak{Z}$ представляет собой (1) монолит, не разделяемый на составные части, и (2) множество всех ассоциаций (не обязательно связанных) слагающих горную породу минеральных зерен, в совокупности образующих базу $\mathfrak{N}$. Дискретная топология предоставляет максимум возможностей для дальнейшего теоретизирования. Но, возможно, проблема состоит в том, чтобы между указанными крайностями найти ту топологию, которая и составляет специфику кристаллической породы как объекта определённого уровня в иерархии неорганической природы.

Следующим шагом является определение горной породы как метрического пространства. Множество $\mathfrak{R}$ называется метрическим пространством, если для его любых элементов i и j определена функция ρ_{ij} , называемая метрикой (расстоянием) и обладающая свойствами: (1) $\rho_{ij} \geq 0$, причём $\rho_{ij} = 0$ равносильно $i \equiv j$, (2) $\rho_{ij} = \rho_{ji}$, (3) для любых трёх элементов i, j, k выполнено $\rho_{ij} + \rho_{jk} \geq \rho_{ik}$. Это определение кажется простым, поскольку напоминает школьный пример евклидовой метрики. Но на множестве минеральных зёрен (в базе топологии) или их произвольных ассоциаций (в самой топологии) в кристаллической горной породе можно определить много других метрик.

К ещё одному определению горной породы как пространства ведёт рассмотрение фундаментальных отношений между её элементами – минеральными зёрнами. Таких отношений три, но каждое допускает логическое отрицание: (1) субстанциальная (не) тождественность, (2) видовая (не) тождественность, (3) (не) контакт

тирование. Анализ показывает, что наиболее интересным для развития теории является отношение неконтактирования, которое рефлексивно, симметрично и не транзитивно, т.е. является толерантностью и превращает горную породу (руды) в пространство толерантности.

Видимо, это максимум того, что может быть определено для всякой кристаллической горной породы (руды). Это топологическое (с различными топологиями в диапазоне от тривиальной до дискретной) и метрическое (с различными метриками, заданными для минеральных зёрен и их произвольных ассоциаций) пространство, а ещё пространство толерантности с образующим отношением пространственного неконтактирования минеральных зёрен. Заметим, что к пространству толерантности ведёт и отношение непустого пересечения ассоциаций минеральных зёрен.

Тезис II. Концепция кристаллической горной породы (руды) может быть построена на фундаменте математической статистики.

Предыдущие определения показывают принципиальную возможность применения фундаментальных математических концепций в интересующей нас области. Но нельзя ли обойтись без них, полагаясь на интуицию? Так, в минералогии и петрографии многие годы обсуждается идея трансляционного порядка. По-видимому, в основании этого лежит психологический феномен – очарование строгой теории, привнесённой в них из кристаллографии. Физические методы не обнаружили её периодического строения. И даже теоретически никто не определил, что следует понимать под элементарной ячейкой горной породы (руды), кроме того лишь, что она должна представлять горную породу по составу и строению. Мы специально не употребляем термин «структура», описательный настолько, что не позволяет развить формальную теорию.

Не менее популярным является представление о «структуре Коксетера» (структуре мыльной пены) как равновесной конфигурации межзерновых границ минерального агрегата, в том числе горной породы (руды). Условия равновесия структуры Коксетера: общий минимум площади межзерновых границ и равенство углов на контактах зёрен – в целом соответствуют физическим представлениям о равновесии мономинеральной горной породы, которое теоретически достижимо путём диффузии атомов через межзерновые границы. Но оно уже недостижимо для полиминеральной породы. Кроме того, структура Коксетера не является периодической, а равновесная форма минерального зерна рассчитана в статистическом приближении и имеет дробное число вершин, рёбер и граней!

Очевидно, бытующие представления об идеальном устройстве горной породы (руды) противоречивы. Но в них присутствует рациональное зерно – явный статистический подтекст, будь то рассуждение об элементарной ячейке или структуре Коксетера. Идея автора состоит в том, чтобы не апеллировать к идеалу горной породы (руды), а разработать статистический метод анализа коррелятивности её составных частей – минеральных зёрен или их ассоциаций. В той или иной аналитической форме, именно здесь задействуются ранее изложенные представления о топологиях и метриках горной породы (руды). Наиболее перспективной для применения представляется хорошо разработанная теория кригинга [4, 8, 10].

В её основе лежит представление об изучаемом феномене как пространственно распределённой случайной функции. Феномен представляется как одна из бесконечного числа его возможных реализаций. Его однородность позволяет принять гипотезу стационарности и применить простейший вариант теории. Применительно к организации горной породы (руды) ковариационный анализ позволяет рассчитать ковариограмму, характеризующую пространственную коррелируемость минеральных зёрен (или их ассоциаций) различных видов в зависимости от расстояния между ними. На её основе процедура кригинга позволяет оценить вероятность принадлежности данного зерна (ассоциации) к тому или иному виду по аналогичной информации об окружающих зёрнах (ассоциациях).

Изучение норитов и габброноритов интрузива Фёдорово-Панских тундр показало, что они являются частично упорядоченными. Минеральные зёрна различных видов коррелированы в них на расстоянии двух координационных сфер. По-видимому, все магматические горные породы являются частично (причём слабо) упорядоченными. Причина этого обсуждалась А.Б. Вистелиусом в его модели идеального гранита (напр., кристаллизация данного минерального зерна исключает зарождение зерна того же сорта в кристаллизационном дворике и повышает вероятность нахождения зерна другого сорта в непосредственном контакте в сформировавшейся горной породе). Но, скорее всего, существуют и неупорядоченные горные породы, реализующие модель «чистой мозаики».

Целью всякой структурной теории, среди прочего, является возможность предсказания положения каждого элемента в пространстве. В этом смысле специфика горной породы (руды) состоит в том, что принадлежность каждого элемента (минерального зерна или их ассоциации) к данному виду предсказуемо с некоторой вероятностью. Предельно упорядоченную (в стиле идеального кристалла) горную породу представить можно, но этот идеал не имеет с реальными горными породами ничего общего. Гораздо ближе к ним совершенно неупорядоченная модель «чистой мозаики». Современное описание идеального кристалла (в духе г, R-

систем Делоне) строится от локального порядка – к глобальному. Степень упорядоченности горной породы (руды) в силу специфики статистического описания фиксируется пространственной ковариограммой, определяемой из всей совокупности межэлементных отношений.

Тезис III. Несмотря на непрерывное изменение модального состава горных пород (руд), их структурная классификация возможна.

Ещё одна важная задача структурной теории горной породы (руды) – построение исчерпывающей классификации. В основе существующих классификаций лежат непрерывно изменяющиеся химический и модальный составы пород при резком подчинении их структурных признаков. Это привело к конвенциональному выбору разделительных границ и давно уже породило пессимизм в отношении самой возможности построения естественной петрографической классификации. Между тем, с формальной точки зрения задача вполне разрешима – непрерывность параметров не противоречит дискретности некоторой функции. Вопрос лишь в том, какие параметры и функцию целесообразно выбрать для описания организации горной породы. Авторский вариант, согласованный с изложенными выше принципами, дан в [1, 3, 5]. Он сводится к тому, чтобы в основу описания горной породы положить не модальный и химический составы горной породы, а отношения между слагающими её элементами, в простейшем случае – вероятности (частоты) контактов минеральных зёрен различных видов. Тип петрографической структуры выражается топологическим типом «структурной индикатрисы» – соответствующей поверхности 2- ... 4-го порядков в n -мерном пространстве, где n – число минералов в горной породе.

Делом будущего является развитие теории структурных перестроек горной породы в различных геологических процессах. Её изложение возможно на языке алгебры матриц. А именно, организация горной породы (руды) в терминах вероятностей различных межзерновых контактов легко записывается в виде симметрических матриц. Преобразование горной породы с сохранением структурного типа есть не что иное, как невырожденное преобразование подобия соответствующей матрицы, хорошо известное в линейной алгебре. Совокупность таких преобразований образует группу подобно тому, как образуют точечную группу движения кристаллического полиэдра или пространственную группу – движения кристаллической решётки. Более того, в рамках алгебры матриц возможно описание качественных (структурных) перестроек горной породы (руды), в том числе с исчезновением или новообразованием минералов. Теория организации и перестроек горной породы (руды) должна быть существенным подспорьем физико-химической теории её твердофазных превращений.

Заключение

Автор считает развиваемый взгляд на организацию горной породы (руды) последовательным и допускающим дальнейшее развитие. Все математические формализмы сводимы к алгоритмам, допускающим автоматическую (приборную) реализацию. Именно такой (технологическо-минералогический) критерий оценки всякой теории неоднократно высказывала В.М. Изюитко в дискуссиях с автором. Является ли статистический взгляд на устройство горной породы (руды) «самым правильным» – рассудит время.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. Состояние и перспективы // Обогащение руд. 1995. № 6. – С. 18-22.
2. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. II. Принцип априорных вероятностей // Обогащение руд. 1996. № 3. – С. 30-33.
3. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. III. Некоторые проблемы систематики структур // Обогащение руд. 1997. № 1. – С. 28-30.
4. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. IV. Индикаторные функции // Обогащение руд. 1997. № 3. – С. 32-36.
5. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. V. К аналитической систематике структур // Обогащение руд. 1997. № 4. – С. 31-33.
6. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. VI. Рассуждение о методе: от конкретного к абстрактному – и обратно // Обогащение руд. 1997. № 6. – С. 27-31.
7. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. VII. Метрики и топологии // Обогащение руд. 1998. № 1. – С. 23-26.
8. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. VIII. Простой и обычный крайгинг // Обогащение руд. 1998. № 2. – С. 32-37.
9. Дискуссия по проблеме «Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах» // Обогащение руд. 1998. № 3. – С. 25-29.
10. *Войтеховский Ю.Л.* Статистический анализ минеральных сростаний в породах и рудах. IX. Дискретный крайгинг, эрмитовы полиномы и гауссов анаморфозис // Обогащение руд. 1999. № 1-2. – С. 46-48.

БАЛАНС ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РУДАХ

Ю.Л. Войтеховский

Геологический институт Кольского НЦ РАН

Минералогам-технологам хорошо известна фундаментальная монография В.М. Изойтко, в которой, среди прочего, уделено внимание вопросам расчёта баланса руд: аналитическим методам определения содержаний химических элементов в минералах и минералов – в горной породе (руде) [1, с. 113, табл. 20]. Но возможна и обратная постановка задачи – как оценить содержания элементов в минералах (что одинаково важно в генетическом и экономическом аспектах) по химическому и модальному составу породы (руды)? Рассмотрение ее разных сторон привело к серии статей [2-6], рецензентом которых также была Виктория Михайловна (см. другую статью автора в настоящем сборнике). Напомним основные результаты исследования.

Метод средних значений. Пусть $C(\alpha, \beta_i)$ – средние содержания элемента α в минеральных фазах β_i . Уравнение баланса для α имеет вид:

$$\sum \beta_i \cdot C(\alpha, \beta_i) = \alpha.$$

В общем случае для расчета концентраций $C(\alpha, \beta_i)$ нужно иметь число уравнений, равное числу фаз β_i . Как правило, это условие легко выполнимо. Из n согласованных химических и количественно-минералогических анализов k можно выбрать C_n^k (число сочетаний из n по k) способами, и это число растёт с n весьма быстро. Решение соответствующих систем уравнений даёт C_n^k концентраций $C(\alpha, \beta_i)$, образующих статистическое (в идеале – гауссово) распределение, математическое ожидание которого и предлагается принять за среднюю расчетную концентрацию $C(\alpha, \beta_i)$. Применим изложенный подход к данным табл. 1.

Таблица 1

Содержания главных минералов и благородных металлов в рудных концентратах из Федорово-Панской интрузии, Кольский п-ов

№ образца	Pn	Cp	Po	Sil	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt	Au
	вс. доли					г/т					
1	0,197	0,203	0,101	0,499		5,23	140,2		0,8	13,25	1,92
2	0,501	0,260	0,147	0,092	1,40	15,33	410,6	0,22	1,85	11,63	3,62
3	0,490	0,363	0,118	0,029	0,4	10,17	403,2	0,28	0,95	23,39	14,42
4	0,526	0,352	0,105	0,017	1,14	8,17	418,7	0,24	2,00	22,4	11,17
5	0,125	0,117	0,135	0,625	0,22	4,96	88,0	0,072	0,45	23,48	8,90
6	0,277	0,204	0,093	0,426	0,10	2,26	164,7	0,07	0,35	8,85	3,22
7	0,580	0,161	0,129	0,130	0,57	6,09	375,4	0,34	0,86	22,29	2,23

Примечание: Pn – пентландит, Cp – халькопирит, Po – пирротин, Sil – силикаты (в целом).

Для расчета концентраций $C(Pd, Pn)$, $C(Pd, Cp)$, $C(Pd, Po)$ и $C(Pd, Sil)$ нужно четыре уравнения баланса вида

$$Pn \cdot C(Pd, Pn) + Cp \cdot C(Pd, Cp) + Po \cdot C(Pd, Po) + Sil \cdot C(Pd, Sil) = Pd.$$

Данные табл. 1 позволяют записать семь таких уравнений и выбрать четыре из них 35 способами. На рис. 1 показаны результаты решения 35 систем уравнений, на рис. 2 – гистограммы расчетных концентраций в сравнении с гауссовыми (с теми же параметрами: средним и дисперсией) распределениями. Во всех случаях гипотеза о гауссовом распределении расчетных концентраций подтверждается критерием Колмогорова-Смирнова на уровне значимости 0.05. То есть, их разброс вызван совместным действием многих причин, среди которых важнейшими являются погрешности анализов и непостоянные концентрации Pd в главных минералах от пробы к пробе. Но среди расчетных концентраций Pd в Cp и Po есть отдельные отрицательные значения (рис. 2), хотя ярко выраженные моды практически совпадают с положительными средними: $C(Pd, Pn)=395$, $C(Pd, Cp)=295$, $C(Pd, Po)=1028$ г/т. В то же время концентрации Pd в Sil почти всегда отрицательны. Вопрос об отрицательных концентрациях требует обсуждения.

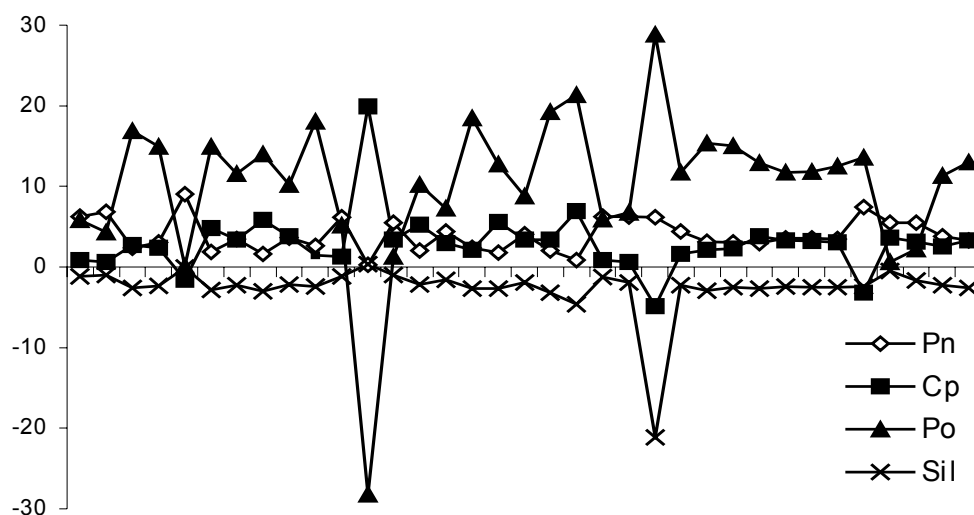


Рис. 1. Расчетные содержания Pd в главных минералах, ×100 г/т.

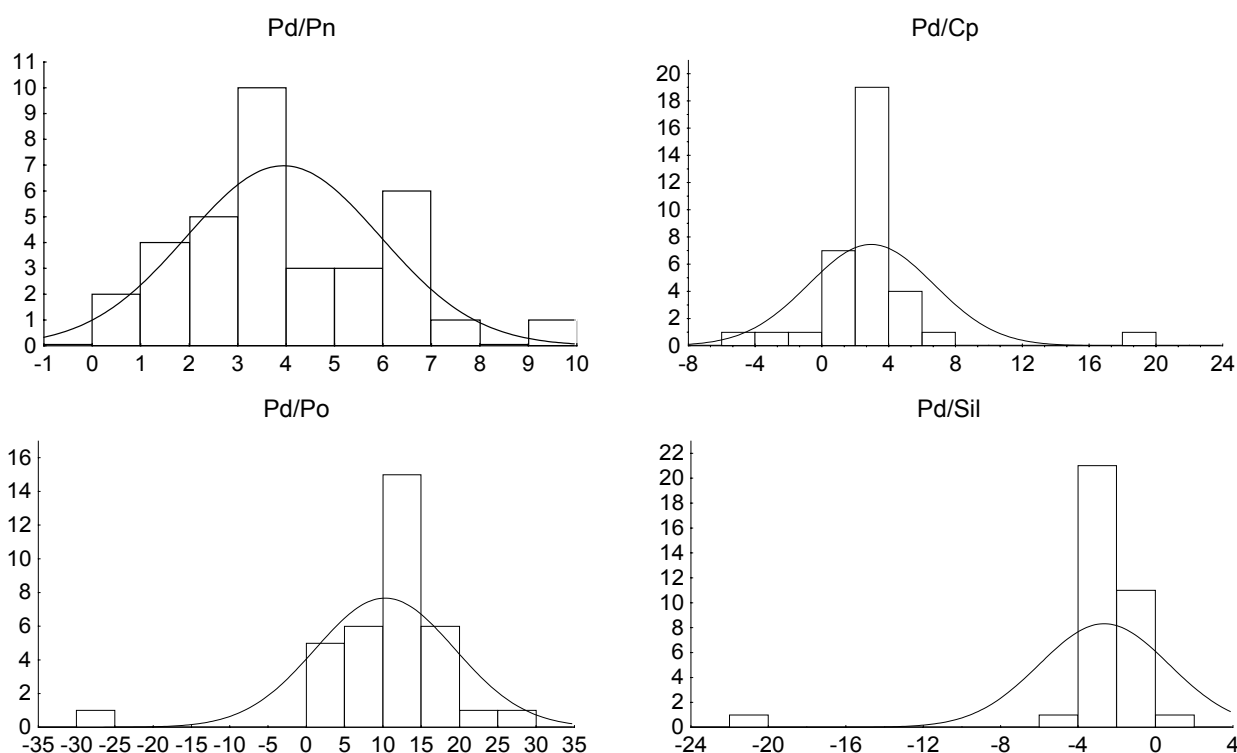


Рис. 2. Гистограммы содержаний Pd (×100 г/т) в главных минералах

Упрощая ситуацию, рассмотрим условную систему уравнений баланса для трех главных минералов – Pn, Cp и Po – относительно Pd в них. Каждое из уравнений задает плоскость в системе координат C(Pd,Pn), C(Pd,Cp), C(Pd,Po). Решением системы будет точка пересечения трех плоскостей. Но, как показывает рис. 3, только в случае (а) она лежит в области положительных концентраций. В случае (б) хотя бы одна из них отрицательна. Это и имеет место для данных табл. 1 с той лишь разницей, что в ней учтены четыре главные минеральные фазы и для графической иллюстрации системы уравнений необходимо 4-мерное пространство. В конечном счете, сложность решения обратной задачи свелась к тому, что искомые концентрации ЭПГ и Au в главных минералах не являются константами даже в виде средних значений по каждой из проб. Каждая из проб является выборкой из генеральной совокупности, неявно характеризующей ее своим уравнением баланса. Искомые концентрации следует воспринимать как случайные величины. Поэтому каждая из плоскостей на рис. 3 является лишь множеством значений концентраций, идеально удовлетворяющих уравнению баланса.

Они должны быть дополнены полями рассеяния решений с убывающими – в направлении от плоскостей – достоверными вероятностями. Тогда даже в неблагоприятном случае рис. 3 (б) с некоторой вероятностью существует положительное решение любой системы уравнений баланса.

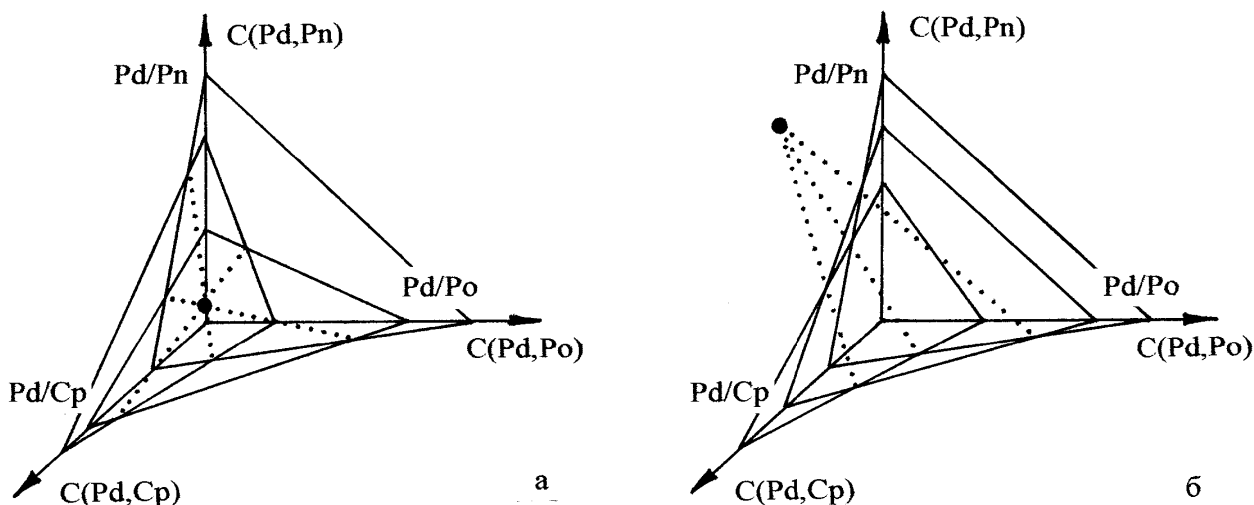


Рис. 3. Природа отрицательных концентраций при решении систем уравнений баланса

При относительно постоянных (но различных) содержаниях элемента в каждом из главных минералов решения систем уравнений баланса должны показывать небольшое рассеяние относительно среднего. При значительной дисперсии содержаний решения систем уравнений тоже покажут высокую дисперсию. Здесь и возникает проблема отрицательных концентраций. При оценке расчетного среднего последние должны рассматриваться на тех же основаниях, что и положительные концентрации. Неоспоримым свидетельством противоречивости исходных данных является положение практически всего распределения расчетных концентраций в отрицательной области, как это имеет место для Pd в Sil (рис. 2). Если эксперимент планируется заранее, то можно рекомендовать следующую процедуру. Положение точки пересечения плоскостей в области положительных концентраций обеспечивается их резко различными ориентациями (рис. 3). Но они задаются величинами отсекаемых по осям координат отрезков Pd/Pn, Pd/Cp и Pd/Po. Так как значение валового содержания Pd в пробе во всех трех отношениях одинаково, то следует предусмотреть резко различные весовые доли главных минералов Pn, Cp и Po от пробы к пробе.

Руды Федорово-Панского интрузива чрезвычайно богаты самостоятельными минералами ЭПГ, спорадически рассеянными в виде мелких включений во всех главных минералах без каких-либо ярко выраженных предпочтений. Решение системы уравнений баланса не может явно указать на присутствие самостоятельных минеральных фаз ЭПГ. Косвенно на это может указывать значительный разброс расчетных концентраций в положительную и отрицательную сторону, что и наблюдается в рассмотренном примере. Совместное рассмотрение результатов весового количественно-минералогического и химического анализов в форме систем уравнений баланса позволяет проверить их формальную непротиворечивость, на которую указывает гауссово распределение расчетных концентраций с положительными средними. Отношение последних дает расчетный коэффициент распределения элемента между минеральными фазами. Неустойчивые концентрации ЭПГ и Au в главных минеральных фазах создают эффект отрицательных расчетных значений. Планируя эксперимент, целесообразно предусмотреть их резко различные весовые доли в анализируемых пробах.

Метод последовательных приближений. Этот метод позволяет избавиться от аномальных расчетных значений $C(\alpha, \beta_i)$. Он состоит в том, что из совокупности последовательно устраняется то значение, которое наиболее удалено от среднего, рассчитанного после предыдущей итерации. Для его проверки поставлен следующий эксперимент. Из монофракций природных минералов (кварц, диопсид, биотит, плагиоклаз и гранат) изготовлены смеси, состав которых приведен в табл. 2. Химическим анализом в них установлены концентрации главных петрогенных оксидов: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO и MgO (табл. 3). Они же были рассчитаны из систем уравнений баланса. При составлении систем брались только уравнения, характеризующие смеси, содержащие все минеральные фазы. В результате получено 56 (число сочетаний из 8 по 5) систем уравнений и, соответственно, по 56 значений концентраций каждого оксида в каждом из минералов. Они показывают достаточно большой разброс, что обсуждалось выше.

Таблица 2

Смеси мономинеральных фракций, мг (вес.%)

№	Кварц	Диопсид	Биотит	Плаггиоклаз	Гранат	Σ
1	13.83(69.81)	1.55 (7.84)	1.43 (7.22)	1.44 (7.27)	1.56 (7.87)	19.81
2	12.0 (60)	2.01(10.05)	2.14 (10.7)	1.97 (9.85)	1.88 (9.4)	20.0
3	9.91 (49.47)	2.7 (13.48)	2.44 (12.18)	2.6 (12.98)	2.38 (11.88)	20.03
4	8.19 (40.77)	1.86 (9.26)	1.93 (9.61)	8.11 (40.37)	0	20.09
5	5.92 (30.22)	3.05 (15.05)	8.25 (40.72)	0	3.04 (15.0)	20.26
6	4.13 (19.98)	12.25 (59.26)	0	2.25 (11.1)	2.04 (9.87)	20.67
7	2.09 (11.43)	0	3.9 (19.47)	6.02 (30.05)	8.02 (40.04)	20.03
8	0	5.22 (27.27)	4.88 (24.56)	4.97 (25.01)	4.8 (24.16)	19.87
9	20.27 (100)	0	0	0	0	20.27
10	0	20.2 (100)	0	0	0	20.2
11	0	0	20.26 (100)	0	0	20.26
12	0	0	0	19.86 (100)	0	19.86
13	0	0	0	0	20.14 (100)	20.14

Так, на рис. 4 показана процедура для SiO_2 в каждой из минеральных фаз, на рис. 5 – для каждого из оксидов в гранате. Расчетные концентрации SiO_2 в кварце сходятся к величине 100.43%, по данным химического анализа (далее в скобках) – 100.53%, в диопсиде – 52.98 (53.46), в биотите – 32.19 (36.65), в плаггиоклазе – 66.98 (66.78), в гранате – 41.29 (39.72). Аналогично, в гранате: Fe_2O_3 – 38.07 (36.25), CaO – -0.05 (0.62), MgO – 4.62 (3.47), Al_2O_3 – 17.90 (20.01). Во всех случаях расхождение не превышает 5%, что представляется хорошим результатом для оценочного расчетного метода.

Таблица 3

Результаты анализа (вес.%)

№ п/п	Fe_2O_3	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3
1	5,22	2,02	2,01	83,51	5,54
2	6,90	2,69	2,46	80,0	5,40
3	8,09	3,64	3,40	74,20	6,99
4	3,13	3,22	1,86	76,36	10,10
5	17,17	3,75	5,67	57,71	10,02
6	5,87	14,23	10,76	63,17	4,70
7	20,48	1,04	2,53	54,15	16,64
8	16,64	6,72	6,77	48,62	13,90
9	0	0,03	0	100,53	0
10	3,69	24,66	15,74	53,46	1,24
11	27,13	0,03	6,86	36,65	15,40
12	0	2,84	0,01	66,78	21,04
13	36,25	0,62	3,47	39,72	20,01

Примечание. Номера смесей соответствуют табл. 2.

В проведенном эксперименте весовые доли минеральных фаз в смесях были известны. Далее для реальных пород и руд их предполагается рассчитывать через объемные доли, измеренные под микроскопом. Следует установить, какую долю погрешности расчетного значения концентрации вносит каждая из стадий (определение весовых долей фаз и концентраций элементов в руде). Не ясно также, можно ли по виду решений распознать наличие в руде самостоятельной минеральной фазы, не учтенной уравнениями баланса. Для изучения этих вопросов запланированы эксперименты.

Метод наименьших квадратов. Разделив уравнения баланса для каждого элемента на свой коэффициент $(\sum \beta_i^2)^{1/2}$, получим тождественную систему:

$$\delta_{ij} c_j - c_{(i)} = 0, i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n. \quad (1)$$

В развернутом виде:

$$\delta_{11} c_1 + \delta_{12} c_2 + \dots + \delta_{1n} c_n - c_{(1)} = 0$$

$$\delta_{k1} c_1 + \delta_{k2} c_2 + \dots + \delta_{kn} c_n - c_{(k)} = 0$$

Каждое из уравнений системы (1) есть уравнение гиперплоскости в нормальной форме. Она замечательна тем, что коэффициенты δ_{ij} суть косинусы углов между радиус-вектором, проведенным ортогонально гиперплоскости из начала координат, и осями c_j , а $c_{(i)}$ – его длина. Если в уравнения системы подставить координаты $c_1, \dots, c_n$ произвольной точки, то полученные величины d_i будут равны расстояниям от нее до соответствующей гиперплоскости (рис. 6):

$$\delta_{ij} c_j - c_{(i)} = d_i, i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, n. \quad (2)$$

В развернутом виде:

$$\delta_{11} c_1 + \delta_{12} c_2 + \dots + \delta_{1n} c_n - c_{(1)} = d_1$$

$$\dots$$

$$\delta_{k1} c_1 + \delta_{k2} c_2 + \dots + \delta_{kn} c_n - c_{(k)} = d_k$$

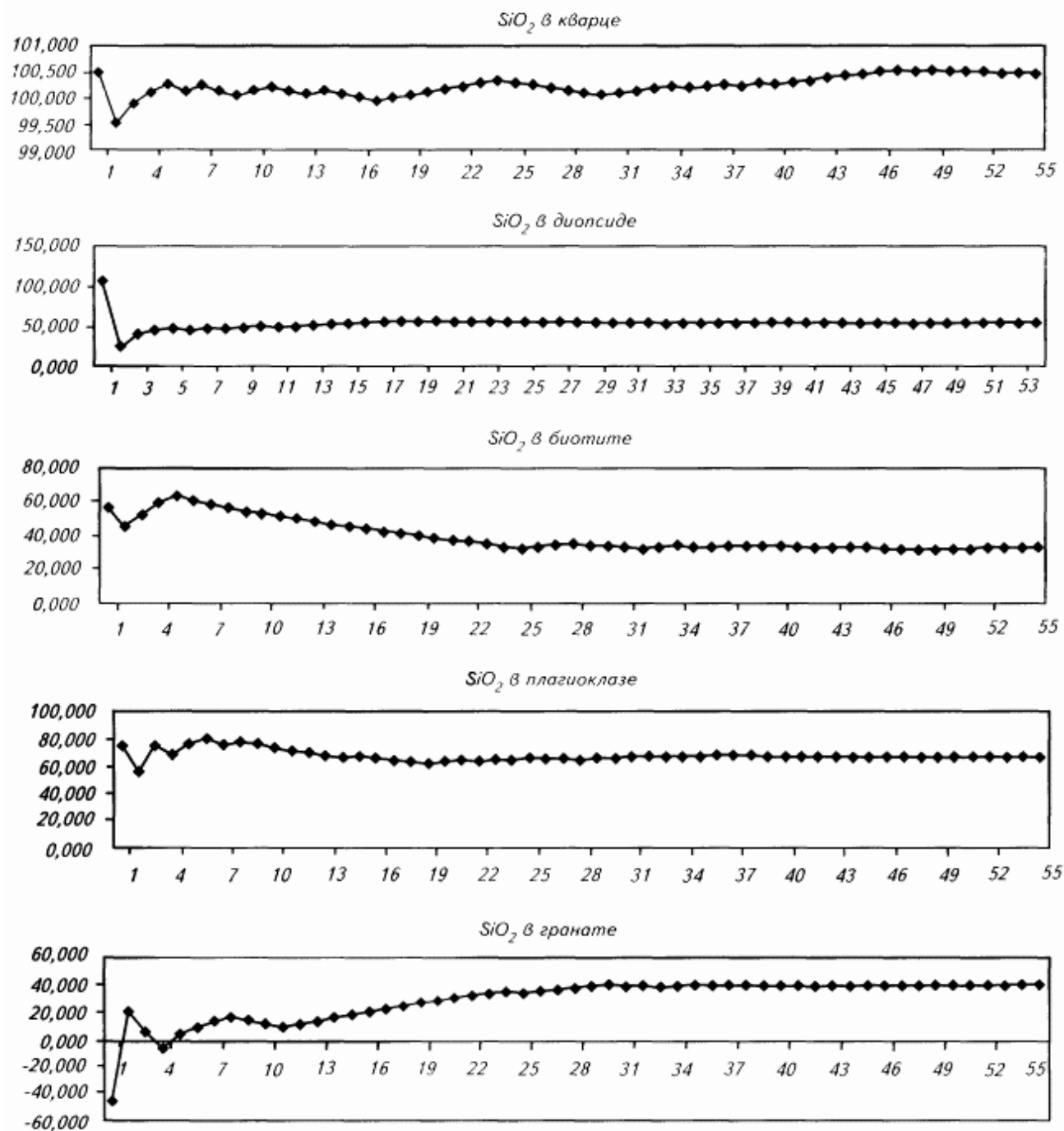


Рис. 4. Процедура последовательного приближения для SiO₂ в минеральных фазах

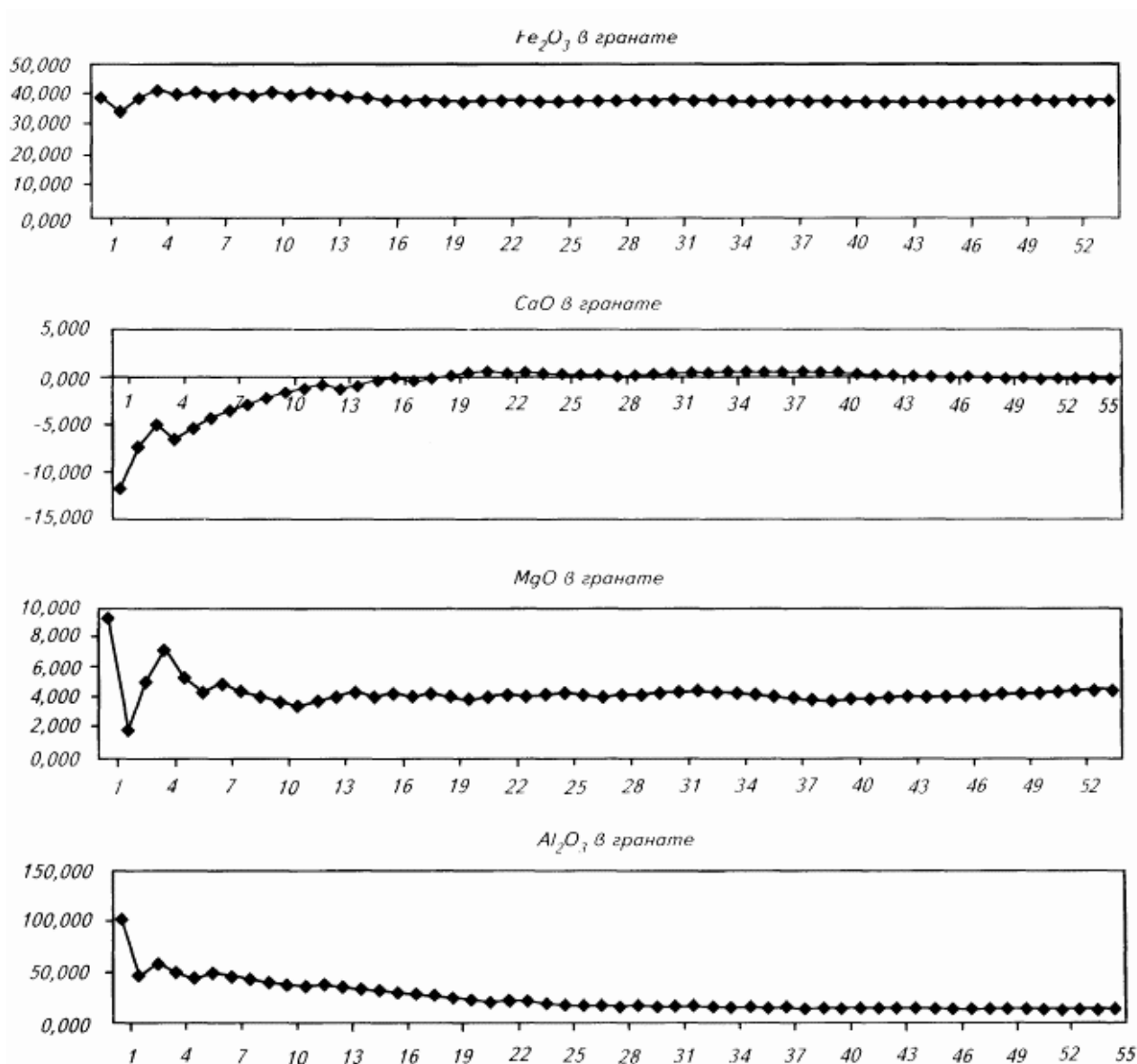


Рис. 5. Процедура последовательного приближения для оксидов в гранате (SiO₂ см. на рис. 4)

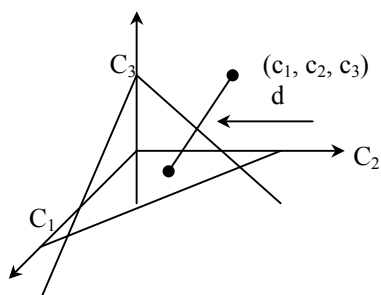


Рис. 6. Расстояние d от точки с координатами (c_1, c_2, c_3) до плоскости, заданной уравнением баланса

Случай $d_i > 0$ означает, что точка и начало координат находятся по разные стороны гиперплоскости, $d_i < 0$ – по одну сторону. Дальнейшая идея состоит в том, чтобы в качестве наилучшей оценки концентраций $c_1, \dots, c_n$ взять значения, минимизирующие сумму квадратов расстояний:

$$\Sigma = d_1^2 + \dots + d_k^2 = [\delta_{11} c_1 + \delta_{12} c_2 + \dots + \delta_{1n} c_n - c_{(1)}]^2 + \dots + [\delta_{k1} c_1 + \delta_{k2} c_2 + \dots + \delta_{kn} c_n - c_{(k)}]^2.$$

Приравнивая к нулю первые производные

$$\begin{aligned}\partial \Sigma / \partial c_1 &= 2 \delta_{11} [\delta_{11} c_1 + \delta_{12} c_2 + \dots + \delta_{1n} c_n - c_{(1)}] + \dots \\ &\quad + 2 \delta_{k1} [\delta_{k1} c_1 + \delta_{k2} c_2 + \dots + \delta_{kn} c_n - c_{(k)}] = 0 \\ &\quad \dots \dots \dots \\\partial \Sigma / \partial c_n &= 2 \delta_{1n} [\delta_{11} c_1 + \delta_{12} c_2 + \dots + \delta_{1n} c_n - c_{(1)}] + \dots \\ &\quad + 2 \delta_{kn} [\delta_{k1} c_1 + \delta_{k2} c_2 + \dots + \delta_{kn} c_n - c_{(k)}] = 0 ,\end{aligned}$$

и группируя члены уравнений при $c_1, \dots, c_n$, представим систему в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \langle \delta_{i1}, \delta_{i1} \rangle & \dots & \langle \delta_{i1}, \delta_{in} \rangle \\ \dots & \dots & \dots \\ \langle \delta_{in}, \delta_{i1} \rangle & \dots & \langle \delta_{in}, \delta_{in} \rangle \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1 \\ \dots \\ \mathbf{c}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle \delta_{i1}, \mathbf{c}_{(i)} \rangle \\ \dots \\ \langle \delta_{in}, \mathbf{c}_{(i)} \rangle \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где скобками $\langle \dots \rangle$ обозначены скалярные произведения, например:

$$\langle \delta_{i1}, \delta_{jn} \rangle = \delta_{11} \delta_{1n} + \delta_{21} \delta_{2n} + \dots + \delta_{k1} \delta_{kn}.$$

$$\langle \delta_{ij}, c_j \rangle = \delta_{11} c_{(1)} + \delta_{21} c_{(2)} + \dots + \delta_{k1} c_{(k)}.$$

Система (3) легко разрешается относительно концентраций $c_1, \dots, c_n$. Нетрудно видеть, что все вторые производные положительны. Тем самым найденные концентрации обеспечивают минимум суммы квадратов расстояний $d_1^2 + \dots + d_k^2$.

Таблица 4

Концентрации компонентов в минеральных фазах (рассчитанные / химический анализ, вес.%)

	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Q	0,04/0,0	0,31/0,03	-0,06/0,0	100,21/100,53	0,58/0,0
Di	3,39/3,69	23,16/24,66	17,61/15,74	53,09/53,46	1,43/1,24
Bi	26,89/27,13	-0,07/0,03	5,82/6,86	32,88/36,65	16,96/15,40
Pl	0,40/0,0	2,12/2,84	-0,95/0,01	67,49/66,78	19,88/21,04
G	37,59/36,25	0,62/0,62	3,95/3,47	39,67/39,72	18,01/20,01

Примечание: Q – кварц, Di – диопсид, Bi – биотит, Pl – плагиоклаз, G – гранат.

Для проверки метода были использованы искусственные смеси природных минералов, рассмотренные выше. То есть, весовые доли β_i минеральных фаз и концентрации элементов в смесях были известны. Решения системы (3) в сравнении с данными химического анализа для каждой из минеральных фаз даны в табл. 4. Расхождение составляет не более 3.77% (SiO_2 в биотите), что представляется хорошей оценкой для расчетного метода. В табл. 5 приведены концентрации SiO_2 во всех минеральных фазах и всех компонентов в гранате, рассчитанные методом последовательных приближений. Они близки к результатам, найденным методом наименьших квадратов.

Таблица 5

Концентрации компонентов в минеральных фазах (метод последовательных приближений, вес.%)

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
Q	100,43	не рассчитывались			
Di	52,97				
Bi	32,19				
Pl	66,98				
G	41,29	38,07	-0,05	4,62	17,89

Нельзя ли улучшить сходимость результатов, модифицировав метод последовательных приближений? В табл. 6 приведены расстояния $d_1, \dots, d_8$ от точки наилучшего решения системы (3) до каждой из гиперплоскостей, заданных уравнениями баланса (максимальные расстояния для каждого из компонентов подчеркнуты). В данном случае нет «плохой» гиперплоскости, отстоящей от точки наилучшего решения системы (3) аномально далеко сразу по всем координатам. Только в этом случае имело бы смысл исключить из рассмотрения соответствующее уравнение баланса, заподозрив в нем грубую ошибку определения коэффициентов Δ_{ij} или C_{ij} .

Таблица 6

Расстояния $d_1, \dots, d_8$ от точки наилучшего решения системы (3) до гиперплоскостей, заданных уравнениями баланса

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Fe ₂ O ₃	0,012	-0,135	<u>0,351</u>	-0,091	-0,117	-0,132	-0,131	0,191
CaO	0,279	0,109	-0,037	-0,153	-0,218	-0,215	-0,242	0,481
MgO	-0,023	0,262	0,008	-0,124	-0,156	-0,066	-0,199	<u>0,334</u>
SiO ₂	<u>1,326</u>	-1,169	0,145	-0,305	-0,234	0,563	-0,732	1,059
Al ₂ O ₃	<u>-1,295</u>	0,869	0,520	-0,117	-0,047	0,396	-0,184	-0,024

Таким образом, предложенный выше метод наименьших квадратов для решения обратной задачи расчёта баланса компонентов в горных породах и рудах можно считать сопоставимым по эффективности с методом последовательных приближений. Но метод наименьших квадратов требует меньших вычислений, что является существенным преимуществом.

Заключение

Удивительно, насколько нетривиальной и ранее не изученной оказалась обратная задача расчёта баланса – нахождение концентраций элементов в минералах по их концентрациям, а также по массовым долям минералов, в породах и рудах. Не все теоретические аспекты задачи изучены, не говоря уже о методических приёмах определения исходных величин. Наиболее интересными представляются разложение суммарной погрешности на составляющие, обусловленные различными факторами, и разработка методических приёмов их минимизации. Это – лишь одно из направлений дальнейших исследований, определившееся в дискуссиях автора с Викторией Михайловной Изойтко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изойтко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. – 582 с.
2. Формы нахождения и баланс благородных металлов в рудах Фёдорово-Панской интрузии (Кольский п-ов) / Н.Л. Балабонин, В.В. Субботин, В.И. Скиба и др. // Обогащение руд. 1998. № 6. – С. 24-30.
3. Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И. Баланс благородных металлов в рудах Фёдорово-Панской интрузии (Кольский п-ов) // Обогащение руд. 2001. № 6. – С. 11-13.
4. Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И. Баланс элементов в горных породах и рудах. Решение обратной задачи для искусственных смесей природных минералов // Обогащение руд. 2002. № 3. – С. 27-29.
5. Войтеховский Ю.Л., Скиба В.И. Баланс элементов в горных породах и рудах. Решение обратной задачи методом наименьших квадратов // Обогащение руд. 2003. № 1. – С. 25-27.
6. Скиба В.И., Войтеховский Ю.Л., Гавриленко Б.В. Баланс элементов в горных породах и рудах. Распределение благородных металлов в хромитовых рудах Сопчеозёрского месторождения (Кольский п-ов) // Обогащение руд. 2004. № 4. – С. 31-34.

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РУД ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Петрова Н.В., Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.

ФГУП ВИМС, г Москва; e-mail vims-ozhogina@mail.ru

Современное состояние минерально-сырьевой базы России, в первую очередь, по металлургическим видам сырья определяет необходимость создания эффективных технологий переработки полезных ископаемых, позволяющих максимально полно извлекать все промышленно ценные минералы. Как показывает практика технологического опробования сырьевых объектов, главными моментами являются:

- 1) выявление возможности обогащения руд применяемыми в промышленности способами или необходимость поиска новых технологий;
- 2) разработка принципиальной схемы и режимов обогащения с установлением возможности получения тех или иных концентратов с прогнозными данными по качеству и извлечению основных полезных компонентов.

Наряду с показателями, характеризующими обогатимость руд, конечные показатели, определяющие ценность руды по выходу, качеству и номенклатуре товарной продукции, устанавливаются на этапе химико-металлургической переработки продуктов обогащения. В первую очередь это относится к неподдающимся обогащению и труднообогащаемым рудам, когда обогащение не приводит к получению кондиционных концентратов либо сопровождается большими потерями ценных компонентов. В этом случае технологическое опробование проводят или непосредственно химико-металлургическими методами, или комплексом механических и химико-металлургических, а в последнее время и биологических методов переработки минерального сырья.

Как показывает опыт, для извлечения ценных компонентов из рудного сырья наиболее перспективны комбинированные технологии. Комплексирование механического (радиометрическая сепарация, гравитация, флотация), химического обогащения руд (кислотное, щелочное, солевое, биохимическое выщелачивание, обжиг), гидро- и пирометаллургических процессов позволяет организовать законченный цикл обработки руды сложного минерального состава с получением конечной товарной продукции (металлов или их соединений) при высоком извлечении.

Создание эффективных технологических схем и совершенствование используемых в схемах процессов практически невозможно без предварительного достаточно глубокого изучения вещественного состава и установления всей суммы минералого-технологических свойств рудного сырья. Немаловажная роль в решении этих проблем принадлежит технологической минералогии, которая позволяет оценивать технологические свойства руд и продуктов их обогащения, что в свою очередь дает возможность эффективно и научно обоснованно решать задачи создания рациональных схем, предусматривающих наиболее полную и комплексную переработку рудного сырья. Многообразие типов руд черных, цветных и тугоплавких металлов, низкие содержания ценных компонентов, сложность минерального состава, комплексность требуют применения нестандартных, сложных комбинированных схем переработки и специальных методов их минералого-технологического исследования с целью получения минералогических характеристик, являющихся основными критериями оценки технологических свойств сырья [1]. Не следует забывать, что для применения химико-металлургических методов необходимо выполнение ряда требований: высокой избирательности используемых реагентов, значительной скорости разложения минералов, возможности попутного извлечения большинства ценных компонентов, экологической безопасности. Направленный поиск эффективных технологий требует знания минеральных форм нахождения металлов в рудном сырье, изучения кинетики и химизма химического взаимодействия минералов, исследования влияния сопутствующих минералов, выявления катализаторов и других стимуляторов разложения минералов, а также осуществления реакций в желаемом направлении.

В течение нескольких десятилетий на ряде отечественных объектов проводились исследования по изучению процессов переработки руд черных, цветных, редких металлов и их концентратов [2,3], что позволило выработать определенную методику изучения химико-металлургического передела сырья методами технологической минералогии. Методика основана на использовании различий в кристаллохимических особенностях разделяемых минералов, определении закономерностей химического и фазового равновесий, химической кинетики, различий в характере и скоростях взаимодействия фаз в перерабатываемом сырье. Исследования включают, помимо определения исходного минерального и элементного состава концентрата, изучение технологических свойств минералов и поведения их в технологическом процессе, а также изучение влияния порообразующих минералов на процесс разложения рудных.

Для полного комплексного использования сырья при разработке технологических гидро- и пирометаллургических схем, прежде всего, необходимы данные о минеральном составе исходного сырья и продуктов его химико-металлургической переработки с диагностикой всех минеральных фаз, количественной оценкой их содержания, форм нахождения в исследуемом продукте полезного компонента (образование им собственной минеральной фазы или соединения, изоморфное вхождение в состав другой фазы). Именно эти данные позволяют прогнозировать выбор технологии извлечения полезного (или нескольких) компонентов, а также технологические показатели переработки руд.

Исследование особенностей состава минерального сырья проводится традиционным для ВИМСа комплексом минералого-аналитических методов (оптическая и электронная микроскопия, рентгенография, магнитометрия, ИК- и ЯГР-спектроскопия, термический и элементный анализы). Главными факторами, определяющими выбор комплекса минералогических исследований, являются особенности состава продукта и сложность технологической схемы.

На стадии поисково-оценочных работ, когда впервые возникает вопрос о качестве и промышленной ценности сырья, обычно достаточно имеющихся данных о вещественном составе руды, и лишь для новых видов минерального сырья уже на этой стадии проводятся специальные технологические исследования. В задачи технологического изучения руд входит:

- разработка принципиальной технологической схемы химико-металлургической переработки сырья до кондиционного товарного продукта;
- установление и обоснование ожидаемых показателей переработки, необходимых для предварительных расчетов ее стоимости;
- выявление локализованных на месторождении разновидностей руд, которые значительно различаются по своим технологическим свойствам и показателям переработки.

Информация о руде должна включать сведения об ее структурно-текстурных признаках (в том числе характере взаимоотношения рудных минералов с минеральной матрицей, гранулярном составе минералов), форме нахождения полезного компонента, о составе и свойствах главных минеральных фаз полезных компонентов. Также необходимы сведения о фазовом составе исходных продуктов с количественной оценкой со-

держания фаз, распределении полезных компонентов по минералам, слагающим перерабатываемый продукт руды. При этом опережающая информация о минеральном составе должна быть достаточно полной.

При химико-металлургическом опробовании проводятся:

- анализ химических превращений сырья в товарную продукцию и выбор из всех возможных технологических методов только одного метода, наиболее соответствующего заданным условиям;
- анализ работы типовых промышленных аппаратов, которые обеспечивают возможность проведения процесса по выбранному методу;
- рассмотрение аппаратурной и технологической схем с экономической и социальной точек зрения.

При этом, важное значение имеют:

1. Сложность минерального состава, заключающаяся в том, что полезный компонент сосредоточен в нескольких минералах, имеющих различные технологические свойства (растворимость в кислотах и щелочах, степень дефектности структур, характер поверхности минерала, характер сростаний с другими минералами и др.). Так, сульфидная медь представлена в концентратах халькозином, ковеллином, борнитом, халькопиритом и др., в окисленных рудах – купритом, теноритом, малахитом, хризоколлой и др.

2. Комплексность руд, обусловленная их полиминеральным составом, в частности, присутствием нескольких рудных минералов. При этом один рудный минерал может содержать два или более полезных компонента, например, W, Mo, Sn, Sc, Cu и Ni в медно-никелевых рудах и др.

3. Для большей части руд характерна тонкая вкрапленность рудных минералов, выделения которых часто составляют сотые или даже тысячные доли миллиметра, а иногда и доли микрона.

4. Низкие концентрации в рудах полезных компонентов, составляющие нередко лишь десятые, а иногда сотые и тысячные доли процента.

5. Непостоянство минерального состава по количеству и соотношению полезных фаз и соотношению их с породообразующими минералами.

Назначение всякого технологического процесса – получение определенных продуктов с максимально возможным выходом. Переработка рудного сырья химико-металлургическими методами включает операции вскрытия и последующей переработки продуктов разложения с получением целевых компонентов в виде товарной продукции. Как правило, операция вскрытия основана на глубоком разложении сырья, результатами которого является возникновение новых фаз. Процесс тем совершеннее, чем полнее сырье переводится в соединения, и чем больше различия в физико-химических свойствах фаз, которые обеспечивают возможность их разделения в последующих операциях.

Для установления схемы химико-металлургического передела продуктов простого минерального состава достаточно провести лабораторные или укрупненно лабораторные исследования. В этом случае технологические свойства продуктов обогащения и возможность их переработки оцениваются по аналогам (стандартным пробам) с известными однотипными месторождениями, и схемы и режимы для технологических исследований принимают также по аналогии с продуктами близкого состава и с учетом особенностей параметров качества исследуемых концентратов.

Следует отметить, что современные руды, особенно цветных и тугоплавких металлов и продукты их обогащения, относятся преимущественно к сложным по минеральному составу видам сырья, при минералого-технологическом изучении которого требуется нетрадиционный подход при проведении исследований. Для них характерен ряд специфических особенностей, влияющих на их технологические свойства и на порядок определения этих свойств. Поэтому при прогнозной минералого-технологической оценке руд нередко возникает необходимость проведения специальных исследований.

На штуфном (для исходных руд) или дробленом материале определяются структурно-текстурные особенности руд, определяется гранулярный состав рудных минералов, степень измененности минералов и выбираются оптимальные параметры измельчения с целью раскрытия ценных минералов и создания большей удельной поверхности твердой фазы для повышения реакционной способности руды и скорости процессов. При этом учитывается ряд факторов:

1. Крупность материала должна быть достаточной для протекания реакции в условиях осуществления процесса в желаемом направлении с максимально возможным извлечением ценных компонентов и с приемлемой для практики скоростью.

2. Возможность протекания побочных процессов, приводящих к технологическим затруднениям, например, осаждение из раствора уже извлеченного в него компонента с блокированием пленочными покрытиями активных точек поверхности взаимодействующего с растворителем кристалла.

3. Влияние различного рода дефектов на равновесие и скорость гетерогенных процессов и связанную с этим избирательность извлечения одного или нескольких элементов, основанную на различиях в скоростях взаимодействия минеральных компонентов.

4. Загрязнение растворов избыточным количеством солей и примесей, что усложняет и удорожает дальнейшую их переработку на чистые соединения металлов.

5. Степень шламообразования и влияние этого параметра на изменение фильтрационных характеристик системы.

Эти особенности должны учитываться при оценке химической активности (реакционной способности) минералов в составе сырья, которая определяет пути, режимы и основные технологические показатели процессов его переработки.

Одной из важнейших характеристик минерального сырья является форма нахождения полезного компонента в руде и тип его связи с матрицей, предопределяющая пути извлечения ценного компонента или компонентов при технологической переработке сырья, разрешающая или запрещающая использование тех или иных методов и реагентов. При этом нужно учитывать переменный состав и структурное состояние рудных минералов и минералов-концентраторов полезных компонентов, а также одновременное нахождение полезного компонента в различной связи с минеральной матрицей и в различной минеральной форме [4].

Ход технологического процесса определяет также набор и соотношение породообразующих минералов и взаимодействие руд и слагающих их минералов с различными реагентами. Установление факторов, влияющих на изменчивость технологических свойств минералов и их реакционную способность, является основой прогнозирования технологических схем. Полная и всесторонняя информация о минеральном составе сырья и особенностях его поведения в технологических процессах, по существу предопределяет технологию извлечения полезного компонента [5].

Реакционная способность системы минеральное сырье – реагент характеризуется скоростью и глубиной протекания процесса. Направление и глубина процесса определяются законами термодинамики, скорость процесса – законами кинетики. Для термодинамической характеристики принимается изменение энергии Гиббса ΔG системы (Дж/моль):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S,$$

где: ΔH – изменение энтальпии вещества или реакции,

T – абсолютная температура, при которой протекает процесс,

ΔS – изменение энтропии вещества.

Для кинетической характеристики рассматривается константа скорости процесса K_V :

$$K = \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot \frac{1}{V_1^{a_1} \cdot V_2^{a_2}},$$

где: $d\varepsilon$ – степень завершенности процесса,

dt – продолжительность процесса,

$V_{1,2}$ – относительные объемы вступающих во взаимодействие компонентов,

$a_{1,2}$ – экспериментальные показатели характера процесса взаимодействия.

Чем большее отрицательное значение имеет ΔG реакции и чем большее положительное значение имеет K , тем более активно будет протекать процесс.

Сравнительный анализ предполагаемого процесса взаимодействия минеральных компонентов в соответствующих условиях с позиции термодинамики и кинетики позволяет определить целесообразность и эффективность его осуществления.

Эти задачи, решаемые на стадии поисково-оценочных работ, требуют специальных экспериментов. При этом проводят изучение технологических свойств минералов, их поведения при взаимодействии с вскрывающими реагентами устанавливают состав, области формирования и растворимость образующих соединений. Изучают влияние породообразующих на процесс разложения рудных минералов.

Совершенствование и оптимизация технологий в значительной степени зависят от изученности физико-химических характеристик систем, на основании которых осуществляется переработка рудного сырья. Первостепенное значение при этом приобретают данные, характеризующие взаимодействие рудных минералов с различными реагентами. Любой технологический процесс является многофакторной системой, в которой взаимосвязь всех участвующих в нем переменных подчиняется сложным закономерностям. Так, значительную роль при химической переработке руд и концентратов играют минералы породообразующего комплекса – их состав, количественные соотношения, поэтому необходимо иметь четкое представление о характере фазовых преобразований, претерпеваемых минералами, чтобы оценить влияние этих преобразований на технологические показатели.

Диагностика сложных многокомпонентных физико-химических систем, которыми являются концентраты, определение характера структурно-фазовых преобразований рудных минералов в сырье должны осуществляться на базе комплексирования современных физических методов анализа (методы оптической микроскопии, в том числе анализа изображений, рентгенографический, термомагнитный, ИК-спектроскопия, рентгеновская микротомография, магнитометрия и др.) [4,6].

Это позволяет методами технологической минералогии оценить избирательность и эффективность используемых реагентов, возможность протекания вторичных реакций, интерпретировать с достаточной степе-

нюю достоверности химизм взаимодействия в системе минерал-реагент и рекомендовать минеральные компоненты, которые могут замедлить или ускорить эти процессы. Так, при выщелачивании халькопирита растворами серной или соляной кислот проведение процесса в восстановительных условиях с добавкой в качестве восстановителя металлического железа обеспечивает конверсию халькопирита в более легкорастворимый халькозин, что позволяет ускорить процесс выщелачивания меди и повысить ее извлечение [7].

В ряде случаев определенное негативное влияние как на гидро-, так и на пиропроцессы оказывает состав и содержание в рудном сырье алюмосиликатных породообразующих минералов (биотита, хлорита, роговой обманки, полевых шпатов и др.). Разложение их под действием кислот приводит к образованию пленок на поверхности частиц руды, замедляющих процесс извлечения полезных компонентов, как это установлено при переработке медно-порфировых руд Каунрадского и Кальмакырского месторождений, в которых нерудные минералы составляют 95%.

Нами изменения алюмосиликатных фаз определялись оптическими и химическими методами. Тонкие фракции руды, а также пленки, образующиеся на поверхности рудных частиц, исследовались рентгенографическим, термическим и электронно-микроскопическим методами.

Одним из критериев оценки поведения рудных минералов в технологических процессах является скорость взаимодействия минералов с реагентами. Она зависит не только от особенностей структуры и состава самих рудных минералов, но и от совокупности свойств минеральных агрегатов. Так, окислительный обжиг молибденита сопровождается образованием на поверхности его частиц твердой оболочки из продукта реакции окисления MoO_3 , создающей внутри диффузионное сопротивление. Скорость реакции окисления MoS_2 падает и определяется структурой этой оксидной оболочки. Проведение обжига MoS_2 при 600°C позволяет снять это затруднение. Как показали результаты исследований огарка, с применением микрорентгеноспектрального анализа, при температуре 600°C оболочка MoO_3 имеет рыхлую структуру и не оказывает диффузионного сопротивления.

Наличие в составе флотационных молибденитовых концентратов примесей сульфидных минералов Cu , Fe , Zn , Pb , кальцита и магнезита способствует протеканию вторичных реакций. Их оксиды, частично сульфаты (продукты окисления указанных сульфидов) и карбонаты в интервале температур $500\text{--}700^\circ\text{C}$, по данным дифференциального термического, рентгенофазового и химического анализов, активно реагируют с MoO_3 , образуя молибдаты, что при последующем, обычно принятом в промышленности, аммиачном выщелачивании огарка может привести к заметным потерям молибдена. Для обеспечения высокого извлечения молибдена, учитывая состав и растворимость новообразованных фаз, целесообразно для выщелачивания использовать растворы соды, легко разлагающие молибдаты.

Вовлечение в переработку сложных и бедных руд связано не только с привлечением новых методов изучения особенностей строения и состава руд и продуктов их обогащения, но и с использованием выявленных при минералого-технологическом изучении технологических свойств минералов или их ассоциаций, которые способны повысить эффективность процессов химико-металлургического передела.

Вариации состава не только главных рудных, но и сопутствующих минералов, сложность и изменчивость минерального состава сырья приводят к нарушениям стабильности технологических процессов и значительным колебаниям технологических показателей и, как следствие этого, к снижению эффективности отработки руд месторождений. Поэтому задача глубокого и всестороннего изучения факторов, влияющих на изменчивость технологических свойств минералов, диктуется непосредственно требованиями практики, в том числе и направленного их изменения при подготовке к технологическому переделу.

Чтобы учесть особенности изменения технологических свойств минералов в динамике, в том числе и направленные на повышение степени их контрастности в технологическом режиме, следует иметь в виду, что они формируются при развитии единой геолого-техногенной системы на различных дискретных уровнях и проявляются в широком гранулометрическом спектре, как на стадии рудоподготовки, так и в различных операциях технологической схемы. Особенно при тонком измельчении (менее $0,044\text{ мм}$) могут значительно изменяться природные характеристики фаз: морфология, гранулометрия и конституция минералов, вплоть до появления новообразованных фаз, явлений аморфизации, полиморфизма, псевдоморфоз минералов [8]. В результате создаются условия для более интенсивного протекания и других физико-химических преобразований системы минерал – среда. Это позволяет при направленном изменении свойств минералов на макро-, микро- и наноуровне воздействовать как на сам минерал, так и на среду.

Для направленного изменения свойств минералов с целью интенсификации технологических процессов используются и разрабатываются такие методы, как акустические, механические, радиационные, ультразвуковые, энергетические, механо-термоактивация и др. Так, воздействие упругих колебаний звукового и ультразвукового диапазона способствует ускорению разложения вольфрамитов примерно в 2 раза и увеличению степени вскрытия на 10%. Интенсифицируется выщелачивание меди из хвостов обогащения медно-цинковых колчеданных руд в условиях проведения процесса с наложением ультразвукового и электромагнитного полей. Энергия микроволнового СВЧ излучения находит применение в различных способах выщелачивания никеля, кобальта и марганца из руд.

Электровзрывная обработка пирротинового концентрата обеспечивает полное разложение пирротина со скоростью примерно в 1,5-2 раза быстрее, чем в принятом промышленностью процессе. Изменения химизма окисления аналогичны для механоактивированного пирротина, хотя и имеет ряд особенностей.

Процессы, происходящие в рудах при тех или других видах воздействия, зависят, как от свойств минералов, от способности их к структурно-фазовым преобразованиям, в частности, от способности их к деформации, наличия «биографических» дефектов, типа кристаллической решетки, так и от типа и интенсивности самого воздействия.

Примерами направленного изменения свойств минералов могут служить такие процессы, приводящие к новому качеству вещества, как механо- и термоактивация, обеспечивающие повышение реакционной способности трудно вскрываемого сырья, содержащего вольфрам, молибден, олово и др. путем сверхтонкого измельчения, механохимической модификации структуры минералов, термической модификации путем обжига вольфрамитом с кальцитом в присутствии минерализаторов, изменение минерального и химического составов перерабатываемого сырья (окислительный обжиг для перевода сульфидов в оксиды и сульфаты) при термоактивации и т.д. Механохимическая активация используется при автоклавно-окислительном выщелачивании медных и медно-никелевых руд при переработке гидрометаллургических растворов (осаждение цветных металлов механоактивированным сульфидом железа), окислении халькогенидов. Так, степень превращения халькогенидов с «рассланной» структурой и извлечение металлов резко повышается, снижаются температура и давление.

Одним из доминирующих факторов является продолжительность механического воздействия. Это открывает возможность, используя различия в механизме и скоростях структурно-фазовых преобразований минералов в рудном сырье, направленно регулировать реакционную способность минералов и реализовать условия их селективного разложения. Так, в результате механохимического выщелачивания комплексных концентратов, состоящих из тетраэдрита $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_3\text{S}_{13}$, халькопирита, пирита и арсенопирита, обеспечивается практически полное избирательное извлечение сурьмы.

Изучение влияния механо- и термоактивации, а также других видов воздействия на структуры и фазовый состав руд и продуктов обогащения различного состава и установление факторов, влияющих на конечный фазовый состав методами аналитической электронной микроскопии, рентгенографии и рентгеновской микротомографии, позволяют установить параметры, обеспечивающие как интенсификацию вскрытия, так и проведение процесса в желаемом направлении. Минералого-технологические исследования в этом направлении способствуют разработке более рациональных технологических схем и повышению технологических показателей. Особенно это касается труднообогащаемого или неподдающегося обогащению сырья сложного минерального состава.

Если для установления химико-металлургической схемы для продуктов простого минерального состава технологические свойства продуктов обогащения и возможность их переработки оценивается по аналогам с известными однотипными месторождениями, то концентраты со сложным составом и трудными условиями переработки должны исследоваться более тщательно в условиях лабораторного опробования с учетом всего комплекса работ, необходимых для проверки и уточнения схем и показателей переработки концентратов до товарной продукции. При этом должны быть получены данные о сопутствующих полезных компонентах и вредных примесях и о распределении их по промпродуктам металлургической переработки.

И следующий этап – оптимизация технологического процесса путем сопоставления со стандартной пробой по основным техническим показателям. В этом случае технологом необходима выборка данных, обладающих наибольшей информативностью, совокупность которых может позволить установить общие закономерности и определить, какими из этих закономерностей можно пренебречь из-за малого влияния их на технологический процесс и установить, какую форму в каждом конкретном случае принимают рассматриваемые зависимости. Для этих целей рекомендовано использовать моделирование процесса, которое сначала проводят на мономинеральных фракциях (или синтезированных аналогах) рудных минералов, затем на простых двух-, трехкомпонентных искусственно составленных смесях минералов, затем на более сложных, приближенных к составу концентрата с уточнением найденных режимов на реальных концентратах. Эти работы целесообразно проводить с привлечением математических методов моделирования и оптимизации химико-металлургических процессов, используя метод теоретических обобщений, в частности, теорию подобия при переходе от лабораторных исследований к инженерной практике [9].

Теория подобия при правильном критическом отношении к ней может успешно использоваться при масштабных переходах (от стадии лабораторных или укрупненно лабораторных к опытно-промышленным) при технологической оценке рудного сырья. Основой подобия является однородная линейная функциональная зависимость между двумя переменными, например, степень разложения – температура и т.п. И если для модели (изучаемое сырье) и прототипа (стандартная проба) соблюдается однородная линейная зависимость для всех независимых переменных обеих систем, то существует полное подобие, а если только для некоторых, то частичное. И, в общем, необходимо выбрать базу данных, базовую систему (температура, продолжительность, давление, концентрация реагента и т.п.), которая может дать однозначный опыт, однозначно описать состояние вещества на любой ступени технологического процесса.

Таким образом, для решения вопроса о возможности прогнозной технологической оценки либо только на основе лабораторных и укрупнено лабораторных испытаний необходимо иметь пробу, которая может рассматриваться как стандартная, отобранная, основываясь на результатах минералогических исследований сырья, базовую систему, состоящую из наиболее характерных свойств продукта (состав химический и минеральный, кинетика и т.п.) и получить максимально возможную информацию с минимальным числом этих величин в процессе проведения эксперимента, даже в условиях его нестабильности. И, наконец, оценить правомерность такого моделирования на основе представлений развиваемых методом теоретических обобщений (теория подобия).

Такой подход позволяет оценить избирательность и эффективность используемых реагентов, полноту разложения и выщелачивания, распределение полезных компонентов по продуктам передела и с достаточной степенью достоверности прогнозировать в зависимости от состава технологические показатели по выбранным в качестве аналога схемам.

При разработке схем химико-металлургического передела для сырья со сложным и непостоянным составом устанавливаются также закономерности, по которым меняются технологические показатели в зависимости от изменения минерального состава, а также от наличия в составе руд балластных и других примесных минеральных компонентов, часто вредных для последующего передела (фосфор, мышьяк, сера, CO_2 и др.). Повышенные содержания таких компонентов приводят не только к увеличению расхода реагентов и снижению качества готовой продукции, но и к ухудшению эффективности процессов и резкому падению технологических показателей за счет протекания вторичных процессов. Если вредные примеси связаны с полезным минералом, разделение возможно лишь при полном разложении последних. В случае связи вредных минеральных компонентов с породообразующими минералами устанавливается возможность отделения их от ценных компонентов путем подготовки сырья с включением в технологическую схему операций, например, кислотного или щелочного выщелачивания, предшествующих химико-металлургическому переделу. Способ предварительной обработки существенно зависит от особенностей химического и минерального состава сырья и особенностей последующего металлургического передела.

Для количественной оценки полученных в исследованиях данных выполняются простые расчеты для определения выхода продуктов и извлечения ценных компонентов в товарный продукт и более сложные для нахождения величин физико-химических термодинамических характеристик процессов. Затем проводится сравнительная оценка данных, полученных при проведении опытов в различных условиях или при различных соотношениях между количествами исходных компонентов для выявления, как состав реакционной смеси повлиял на технологические показатели и качество получаемых конечных продуктов. Полученные данные позволяют устанавливаться взаимосвязи между найденными значениями определяемых величин и соответствующими характеристиками и особенностями изучаемых процессов, их природой, и по экспериментальным данным находят оптимальные условия осуществления технологического процесса.

В совокупности, экспериментальные данные и данные минералогических исследований дают обширную информацию для прогнозной оценки промышленной ценности и качества труднообогатимых и практически необогатимых руд непосредственно химико-металлургическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чантурия В.А. Состояние и перспективы обогащения руд в России // Цветные металлы, 2002, № 2. – С.15-21.
2. Александрова И.Т., Петрова Н.В. Состояние и перспективы развития технологической минералогии в области изучения химико-металлургических процессов // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. Сборник трудов. М., 1987. – С.33-39.
3. Ануфриева С.И., Ожогина Е.Г., Петрова Н.В., Рогожин А.А. Изменчивость и преобразование минеральных и техногенных фаз в процессах химико-металлургической переработки сырья // Труды II Ферсмановской научной сессии Кольского отделения Российского минералогического общества. Апатиты, 2005. – С.142-144.б
4. Сидоренко Г.А. Роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы страны // Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. Сборник трудов. М., 1987. – С.10-16
5. Ожогина Е.Г., Юсупов Т.С. Минералогические исследования – основа априорной оценки технологических свойств природного и техногенного сырья. // Современные проблемы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Материалы Международного совещания. СПб, 2005. – С.19-21.
6. Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. Применение комплекса методов для технологической оценки руд черных и цветных металлов // Разведка и охрана недр, 2005, № 4. – С.33-36.
7. Дрейзенгер Д., Абед Н. Фундаментальные исследования выщелачивания халькопирита с использованием металлического железа. Ч.I. Кинетический анализ // Гидрометаллургия, 2002, 66, №1-3. – С.35-37.
8. Пирогов Б.И. Изучение и оценка природы технологических свойств минералов при обогащении руд различных генетических типов // Традиционные и новые направления в минералогических исследованиях. М., ИГЕМ РАН, ВИМС.2001. – С.120-122.
9. Бочкарев Г.Р., Ростовцева В.Н. Влияние ускоренных электронов на структурные и технологические свойства руд и минералов. // Доклады РАН. Сибирское отделение, 1992, № 2. – С.87-93.

ПРОГНОЗ И ПОИСКИ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПИРИТА

Джангиров М.Ю.¹, Богилев А.В.²

¹Южно-Российский государственный технический университет, г.Новочеркасск, Россия

²Южный научный центр РАН, г.Ростов на Дону, Россия

Колчеданосная полоса Северного Кавказа имеет протяженность более 200 км. Металлогеническая зона Передового Хребта содержит 14 рудных залежей и более 350 зон гидротермальной рассеянной метасоматической пиритизации.

При оценке перспектив каждого из многочисленных колчеданопоявлений в первую очередь используются генетические показатели руд и минералов. Доказано [1, 2], что все промышленные рудные залежи генетически принадлежат к производным субмаринного гидротермально-осадочного рудогенеза. Безрудные зоны пиритизированных метасоматитов конвергентны по своему составу околорудным метасоматитам, сопровождающим промышленные залежи. По всей колчеданосной полосе остро стоит вопрос выделения среди многочисленных точек, зон и участков минерализации околорудных метасоматитов- объектов гидротермально-осадочного генезиса. Минеральный состав и фации метасоматитов (анхикварцевая, кварц-серецитовая, кварц-серецит-хлоритовая, кварц-хлорит-альбитовая) и тех и других одинаковые. Проходящим индикаторным минералом во всех метасоматических колчеданопоявлениях является пирит, которому принадлежит роль минерала-индикатора.

Пирит – ведущий и доминирующий минерал колчеданного оруденения. Он занимает господствующее положение во всех типах колчеданного оруденения и минерализации.

В ходе исследования многочисленных колчеданных объектов были выделены [3] генетические типы пирита (осадочно-диагенетический, автобластический, гидротермально-метасоматический и метаморфогенный), участвующие в гидротермально-осадочном рудогенезе.

Ведущие группы структур колчеданных руд являются типоморфными и определяют генетический тип (табл.1) и их фациальную принадлежность. Зональность роста пирита, специфичная для руд колчеданных месторождений, относится к скрытым структурным показателям минерала и выявляется путем различных приемов электролитического травления [4]. Для пиритов околорудных метасоматитов и зон пиритизированных метасоматитов свойственно сочетание зональности 1 и 2 рода. Однако, для пиритов зон рассеянной гидротермально-метасоматической минерализации типоморфна зональность 2 рода. При различии в рамках единого генетического типа (гидротермально-метасоматического) пирита в околорудных метасоматитах более ярко проявляется зональность 1 рода с числом зон роста 12-18, зональность роста пирита 1 рода в безрудных метасоматитах обычно меньше (3-6).

Исследования колчеданных руд Северного Кавказа и Южного Урала [3,5,6,7,8] применительно к определенным морфологическим разностям пирита дают основания считать такие минералофизические показатели как микротвердость и термо-Э.Д.С. типоморфными для его генетических разновидностей (табл.1).

В генетически сложных, комбинированных и полихронных колчеданных залежах пириты чистой генетической линии явление крайне редкое. Наличие одного или двух крайних генетических типов пирита указывает на безрудную минерализацию. Практика изучения более 50 колчеданных месторождений и 500 проявлений пирита в продуктивных толщах показала, что гидротермально-осадочный процесс завершается формированием тел колчеданных руд, как отмечено выше, а гидротермально-метасоматические проявления пирита, как правило, являются безрудными.

Таблица 1

Типоморфные параметры генетических типов пирита

	Осадочно-диагенетический	Автобластический	Гидротермально-метасоматический	Метаморфо-генный
Структуры агрегатов	Гелевая, коломорфная, фрамбоидальная, концентрически-зональная, радиально-лучистая	Мелко-грубозернистая, порфиробластическая, гипидиоморфно-зернистая	Гребенчатая, графическая, метазернистая, ситообразная	Азональная, тройниковых контактов, брекчированная, катаклаза,
H, кгс/мм ²	420-980 780-1010	1200-1590	1240-1450	1700-2190
Термо-Э.Д.С., мкВ/°С	+280 +560 +120 +280	-320 +400	+4 +440 -35 -350	-90 -360

Нашими исследованиями на примере Худесского и Быковского месторождений было показано, что зональное распределение генетических типов руд в полигенных колчеданных залежах соответствует изменению физических параметров руд и базисного минерала колчеданных руд – пирита. Постепенный характер пе-

рехода одного типа руд в другой в полигенных рудных телах совпадает с постепенными направленными изменениями типоморфных минералофизических показателей пирита, которые закономерно изменяются в разрезах полигенных, комбинированных колчеданных залежей и характеризует скрытую зональность рудных тел, определяемую изменением генетического типа, состава и степени метаморфизма.

Изучение минералофизических и анатомических свойств пирита дает возможность уже на поисковом этапе разбраковывать многочисленные колчеданопроявления (зоны пиритизации) на промышленно перспективные гидротермально-осадочные и малоперспективные гидротермально-метасоматические объекты, а при необходимости определять уровень эрозионного среза колчеданной залежи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колчеданные месторождения Большого Кавказа. М.: Недра, 1973. 225 с.
2. *Богуш И.А., Старостин В.И.* Руднофизическая зональность полигенных колчеданных залежей Северного Кавказа. Геология рудных месторождений. – 1982. – №1. – С.93-98.
3. *Богуш И.А.* Генетические типы и онтогенез дисульфидов железа колчеданной формации Северного Кавказа. Л.: Наука, 1985. – С. 67-72.
4. *Галопен Р., Генри Н.* Исследование непрозрачных минералов под микроскопом. М.: Мир, 1975. – С.153-159.
5. *Богуш И.А.* Минералогенетическая информативность термоэлектрических свойств пиритов колчеданных руд Северного Кавказа. Докл. АН СССР, 1979, т.245, №2.
6. *Богуш И.А.* Типоморфизм термоэлектрических показателей пиритов колчеданных месторождений // Обогащение руд. СПб. № 5, 2002. – С. 19-22.
7. *Ракчеев А.Д.* Новые физико-химические методы изучения минералов, горных пород и руд. М.: Недра, 1989. – 230 с.
8. *Богуш И.А.* Микротвердость пиритов как поисково-оценочный критерий медно-колчеданных рудопроявлений Урупо-Лабинского района (Сев. Кавказ). Докл. АН СССР. 1976. Т. 229, №2. С.425 – 427.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ БОГАТЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД

Хашковская Т.Н., Лялинов Д.В.

ОАО «Институт Гипроникель», С-Петербург; e-mail tnhas@nikel.spb.ru dvlal@nikel.spb.ru

Одной из важнейших целей минералого-технологических исследований руд является решение вопроса о гранулометрическом составе главных рудных минералов и о необходимой степени измельчения сырья, при которой происходит их наиболее эффективное раскрытие. Эта задача может быть решена с помощью специализированных исследований с применением метода анализа микроскопических изображений измельченной руды.

На базе этих же исследований решается вторая важная проблема — прогнозирование теоретических минералогически лимитированных показателей извлечения металлов в процессе обогащения руд по исследуемой схеме и оценивается эффективность выбранной технологической схемы.

Комплекс указанных исследований разработан в ОАО «Институт Гипроникель» на базе отечественной программы ИСТА Видео Тест и системы управления базами данных Microsoft Access 2000.

Разработанная методика демонстрируется на примере богатой сульфидной медно-никелевой руды Талнахского рудного узла ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель». Основная задача обогащения данной руды сводится к максимальному выведению пирротина из металлургической переработки и селективному получению медного и никелевого концентратов с максимальным содержанием целевых металлов и высоким извлечением в концентрат.

Результаты минералогического моделирования, как и в зарубежных методиках минералогического анализа, таких как MLA и QEMScan, так и в предложенной ОАО «Институт Гипроникель», представляются в виде графиков, с которых снимаются искомые технологические показатели.

Следует иметь в виду, что получаемые показатели технологического процесса являются теоретическими, которые могут быть максимально достигнуты при обогащении изучаемого сырья.

Так, анализ раскрытия рудных минералов выполняется на кумулятивных кривых с осями: x — виды сростков относительно главного минерала процесса, y — классы крупности, на которые рассеян продукт, z — накопленная доля главного минерала процесса.

Класс крупности с наиболее эффективным раскрытием главных рудных минералов демонстрируется на кривых с осями: x — класс крупности, y — доля раскрытого минерала.

Анализ зависимости содержания/извлечения проводится на кривых с осями: x — содержание металла в продукте, y — извлечение металла в концентрат.

Все исследования проводятся на измельченном до заданной крупности материале, который подвергается классификации по крупности с использованием стандартных сит, для крупных классов, и гидравлического классификатора тонких частиц Warman Cyclosizer для классов тоньше 71 мкм. Из выделенных классов отбираются навески для приготовления препаратов для минералогических исследований и для химического анализа на никель, медь и серу.

Исходными данными для построения названных кривых являются результаты обработки замеров площади каждого зерна, которые снимаются на базе оптического микроскопа с изображений измельченной руды (рисунок 1) с помощью программы Видео Тест. В каждом зерне, кроме площади, фиксируется доля каждого минерала в процентном отношении.

Система УБД Microsoft Access позволяет накапливать информацию о минеральном составе каждого отдельного зерна. Привлечение данных о химическом составе минералов и их плотности позволяют получать различные сведения об исследуемом материале, а также контролировать представительность учтенной выборки путем сопоставления содержаний компонентов, полученных в ходе минералогического анализа с данными химического анализа.

Для минералогического моделирования показателей выведения пирротина в хвосты принят шаг разделения соротков 25% масс. В результате все зерна разделены на следующие группы: свободный пирротин (100%), соротки, богатые пирротином (75–100%), соротки с количеством пирротина 50–75%, соротки с количеством пирротина 25–50%, соротки с малым количеством пирротина 0–25% и зерна без пирротина. Шаг разделения минералов по сороткам может быть изменен в зависимости от индивидуальных особенностей конкретной руды.

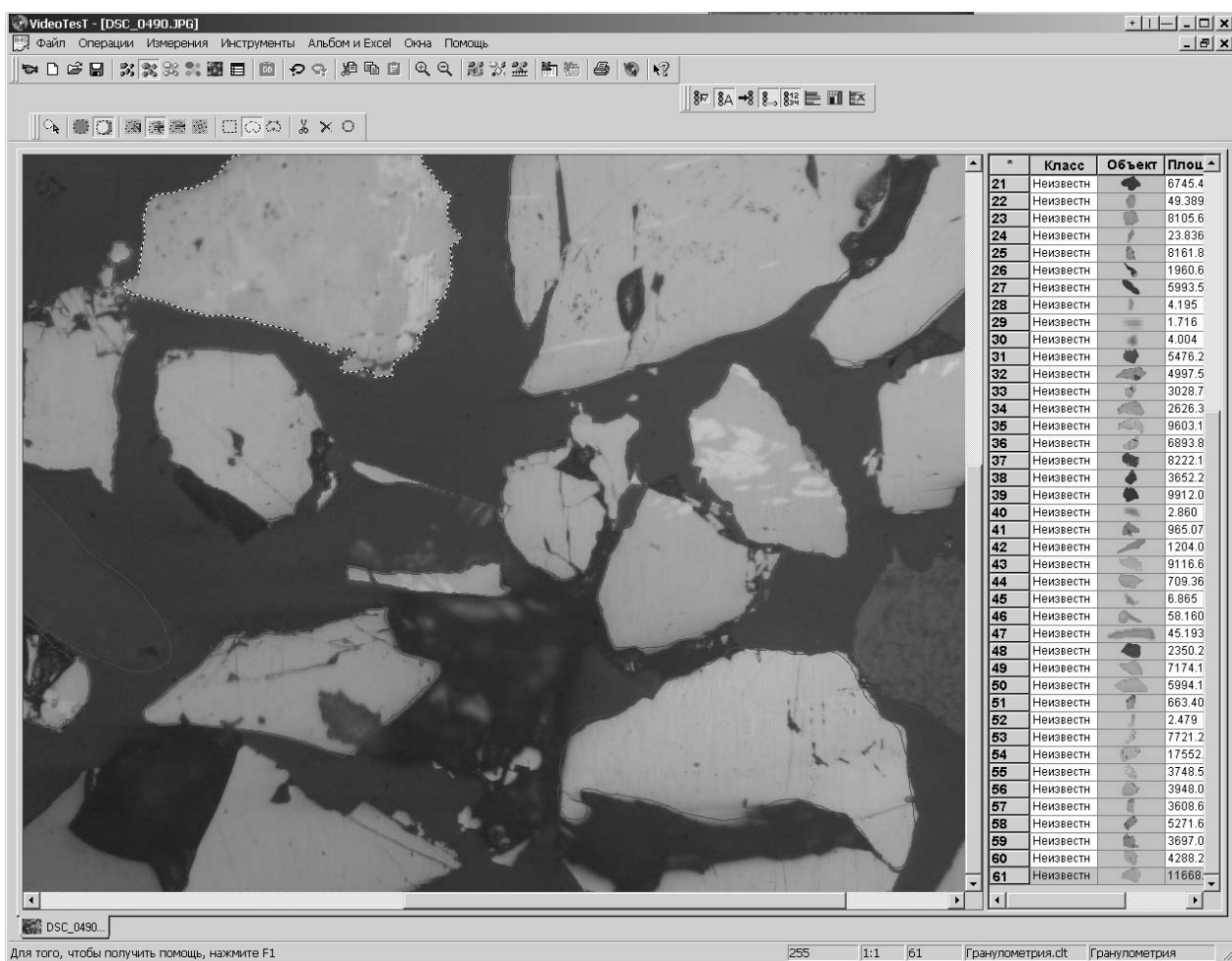


Рис. 1. Изображение измельченной руды (программа Видео Тест)

Для моделирования показателей медного концентрата принят шаг разделения соротков 25% масс. халькопирита, аналогично, для моделирования показателей никелевого концентрата принят шаг разделения соротков 25% масс. пентландита. В результате все зерна разделены на такие же группы соротков, как и для пирротина.

В результате обработки проведенных замеров получены:

1) Для моделирования показателей выведения пирротина в хвосты:

— минеральный состав групп зерен (% масс.), разделенных по доле в них пирротина по каждой фракции крупности и в целом по пробе;

— распределение каждого минерала (% масс.) по зернам, разделенным по доле в них пирротина по каждой фракции крупности и в целом по пробе;

2) Для моделирования медного концентрата:

— минеральный состав групп зерен (% масс.), разделенных по доле в них халькопирита по каждой фракции крупности и в целом по пробе;

— распределение каждого минерала (% масс.) по зернам, разделенным по доле в них пирротина по каждой фракции крупности и в целом по пробе;

3) Для моделирования никелевого концентрата:

— минеральный состав групп зерен (% масс.), разделенных по доле в них пентландита по каждой фракции крупности и в целом по пробе;

— распределение каждого минерала (% масс.) по зернам, разделенным по доле в них пентландита по каждой фракции крупности и в целом по пробе.

1. Минеральный состав руды по данным минералогического моделирования

Для пробы ТС-2005 по результатам моделирования получены данные полного минерального состава (таблица 1) по фракциям отсева и в итоге — с учетом выхода каждой фракции — по пробе в целом.

Таблица 1

Минеральный состав пробы по видам сростков (% масс.)

Класс крупности	Минерал	Доля минерала в зерне				Свободные зерна	Сростки	Проба
		До 25	25–50	50–75	75–100			
Проба	Халькопирит	0.28	0.67	1.87	1.91	4.73	5.29	10.02
	Пентландит	1.47	1.39	1.92	2.71	7.49	3.36	10.85
	Пирротин	0.78	1.62	3.03	15.23	20.66	38.02	58.68
	Пирит						0.06	0.06
	Кубанит	0.10		0.04	0.08	0.22	0.13	0.35
	Валлериит	0.03				0.01	0.04	0.04
	Магнетит	3	0.10	0.04	0.11	0.26	3.46	3.72
	Нерудные	0.03	0.06	0.24	0.66	0.99	15.29	16.28
	Всего	2.69	3.84	7.14	20.71	34.39	65.61	100.00

Содержание в пробе халькопирита составляет ~10% масс., пентландита ~11% масс., а пирротина ~ 59% масс. Важно отметить, что кубанит (второй минерал-носитель меди) присутствует в незначительном количестве, как и валлериит.

Из таблицы следует, что при общем содержании пирротина в пробе на уровне 59%, свободный пирротин составляет 38%. Кроме того, богатые им сростки составляют более 15%.

Такое подразделение позволяет не только качественно, но и количественно оценить степень раскрытия главных рудных минералов.

2. Раскрытие главных рудных минералов

На рисунке 2 показана степень раскрытия пирротина при помоле руды до 80% масс. класса 71 мкм. Во всех классах крупности, включая самые верхние, пирротин, главным образом, представлен свободными зернами и богатыми сростками, причем доля собственно свободных зерен растет с утонением материала.

Открытый халькопирит (рисунок 2) и его богатые сростки преобладают только в классах тоньше 33 мкм. Линия, характеризующая пробу в целом, показывает, что достижение высокого извлечения меди возможно, однако приведет к разубоживанию концентрата.

Пентландит (рис.3) повсеместно, за исключением, пожалуй, только самого тонкого класса закрыт и находится, главным образом, в виде бедных сростков.

Данные по раскрытию главных рудных минералов используются для определения эффективной крупности измельчения. Класс крупности с максимальным раскрытием определяется по крутизне кривой. Наиболее предпочтительным классом раскрытия является класс, когда кривая наклонена под углом ~45° что в геометрии соответствует равнобедренному прямоугольному треугольнику.

Раскрытие пирротина наблюдается уже в грубых фракциях от -100 мкм и происходит постепенно до крупности +24 мкм (77%) (рис. 5). В более тонких фракциях дальнейшего высвобождения пирротина не происходит или происходит мало, что также указывает на крупность возможного доизмельчения питания.

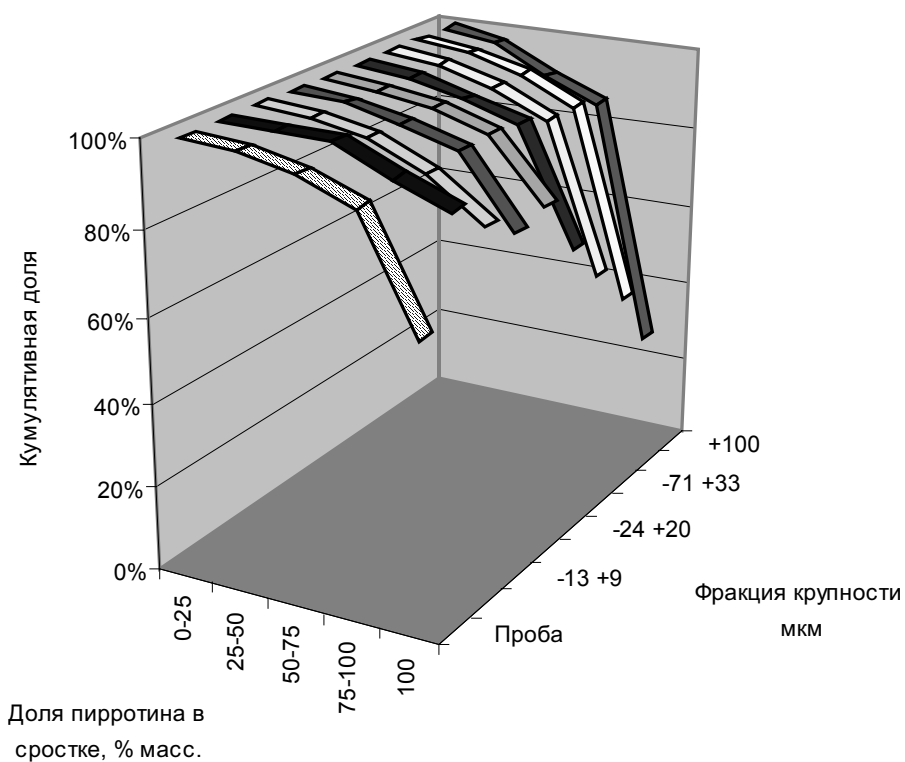


Рис.2. Кумулятивное раскрытие пирротина в разных классах крупности

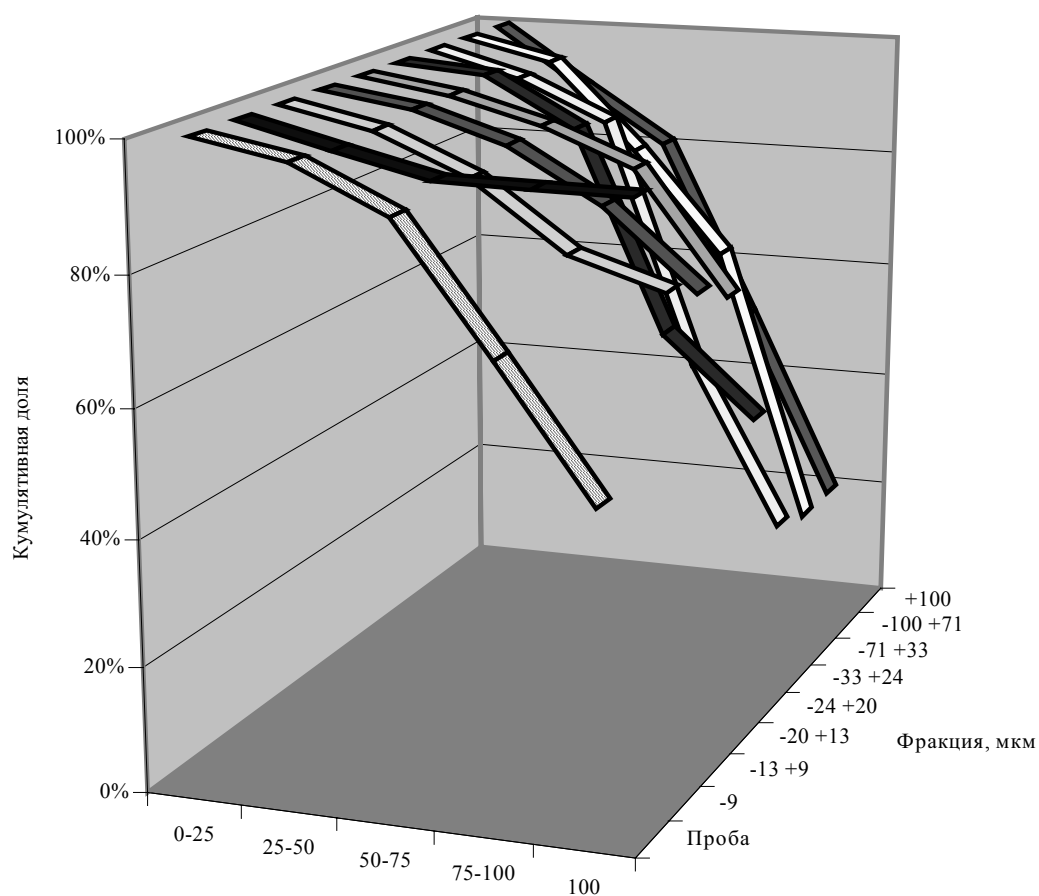


Рис.3. Кумулятивное раскрытие халькопирита в разных классах крупности

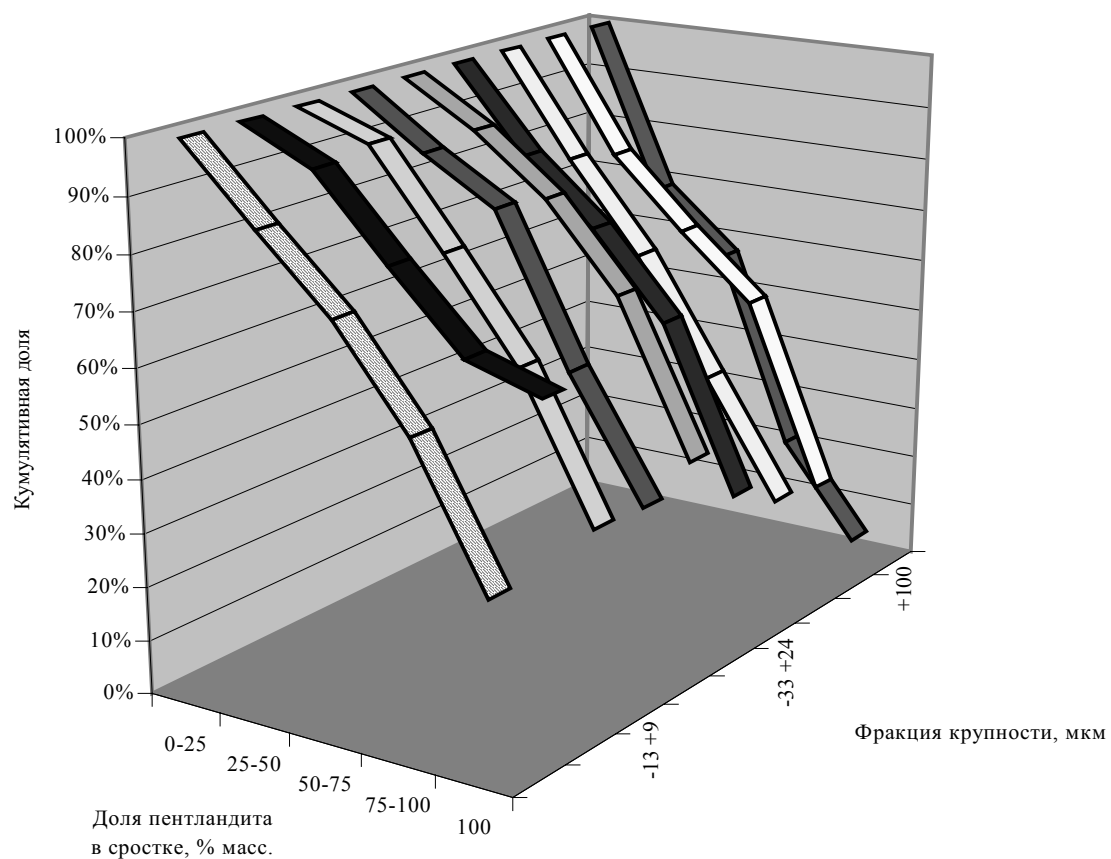


Рис.4. Кумулятивное раскрытие пентландита в разных классах крупности

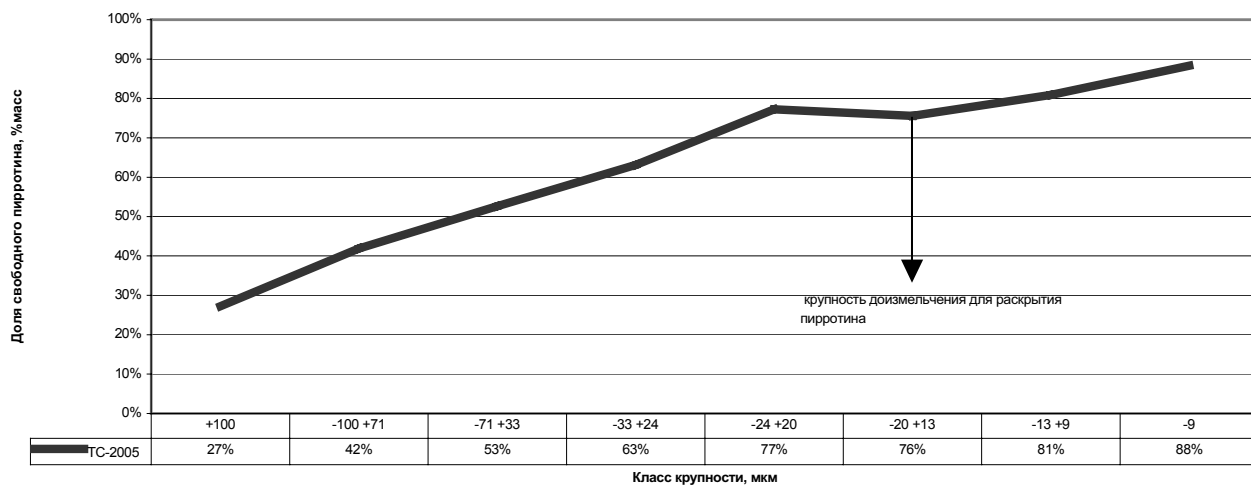


Рис. 5. Раскрытие пирротина по классам крупности

Эффективное раскрытие халькопирита (рис.6) начинается в классе крупности -71+33 мкм (22%) до -24+20 мкм (68%). Возможно дораскрытие халькопирита в классе -13+9 мкм, что позволит высвободить еще около 15% халькопирита.

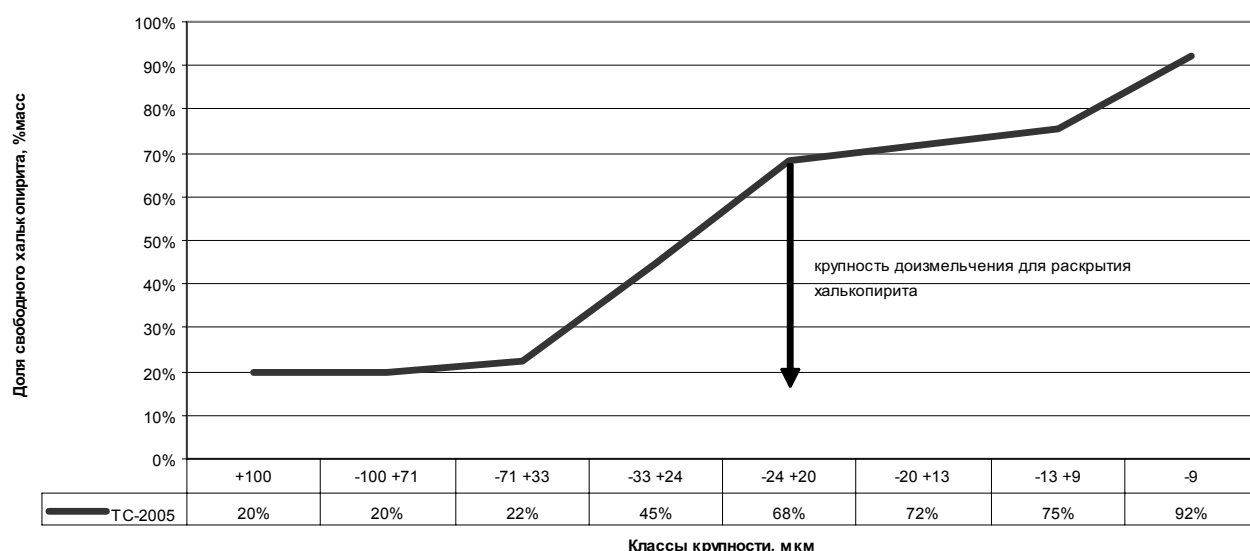


Рис. 6. Раскрытие халькопирита по классам крупности

Отмеченная динамика раскрытия халькопирита указывает на его гранулометрическую неоднородность.

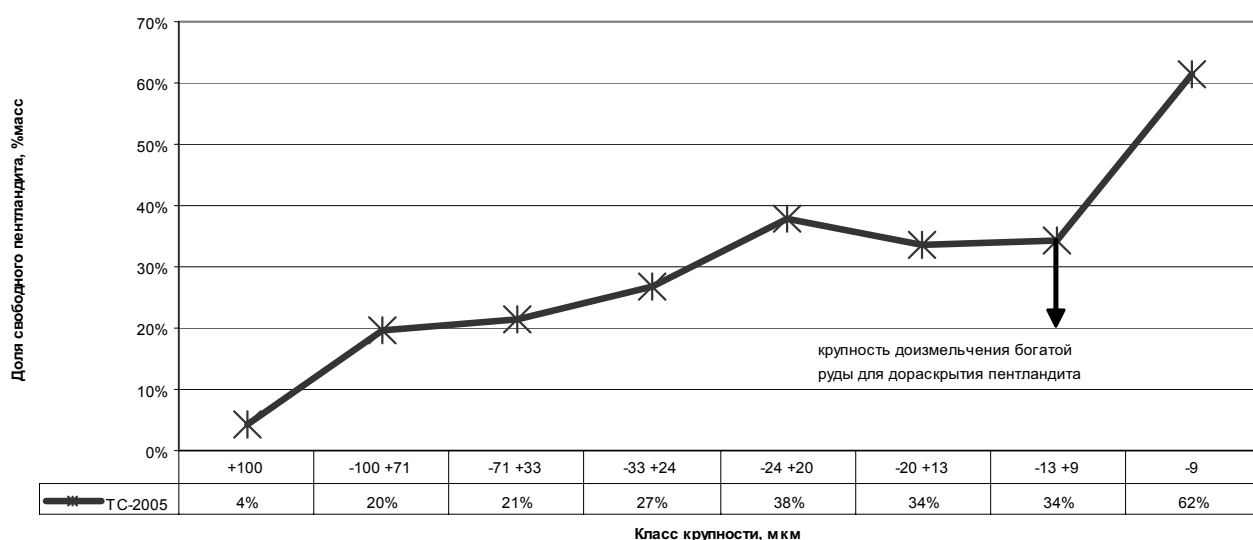


Рис. 7. Раскрытие пентландита по классам крупности

Раскрытие пентландита богатой руды происходит в классе крупности постепенно от крупного класса -100+71% масс., когда раскрывается около 20% масс. пентландита до класса -24+20 мкм с долей раскрытого пентландита всего 38% масс. Эти показатели относятся к зернистому пентландиту, доля которого в руде невелика. В более тонких классах наблюдается высвобождение пламенивидного пентландита. Оно начинается в тонкой фракции -13+9 мкм, максимальное раскрытие пентландита наблюдается в шламах (-9 мкм).

Таким образом, наиболее эффективно в исследуемой руде происходит раскрытие халькопирита, затем пирротина и труднее всего пентландита.

Это свидетельствует о том, что значительное количество пентландита остается в сродках, прежде всего, с пирротином. Поэтому недораскрытие пирротина приведет к значительным потерям пентландита. Наиболее эффективное раскрытие пирротина и связанного с ним пентландита происходит в классах -24+13 мкм. В связи с этим в технологическом цикле можно рекомендовать доизмельчение до крупности, которая обеспечит преобладание частиц размером около 13–24 мкм.

3. Параметры выведения пирротина из металлургической переработки

Для выведения из процесса обогащения пирротина в виде свободных зерен и богатых сростков с долей пирротина 75–100% масс. достаточно грубого измельчения до крупности -71 мкм.

Если предположить, что пирротинный продукт будет состоять из зерен свободного пирротина и его богатых сростков с долей пирротина 75–100% масс., то из исследуемой руды может быть выведено ~91% масс. пирротина от всего пирротина пробы, что составит 38% масс. от питания. Однако с ним будет потеряно ~11% масс. пентландита и ~2% масс. халькопирита. Потери никеля при этом составят 16% масс. (рис. 8, 9).

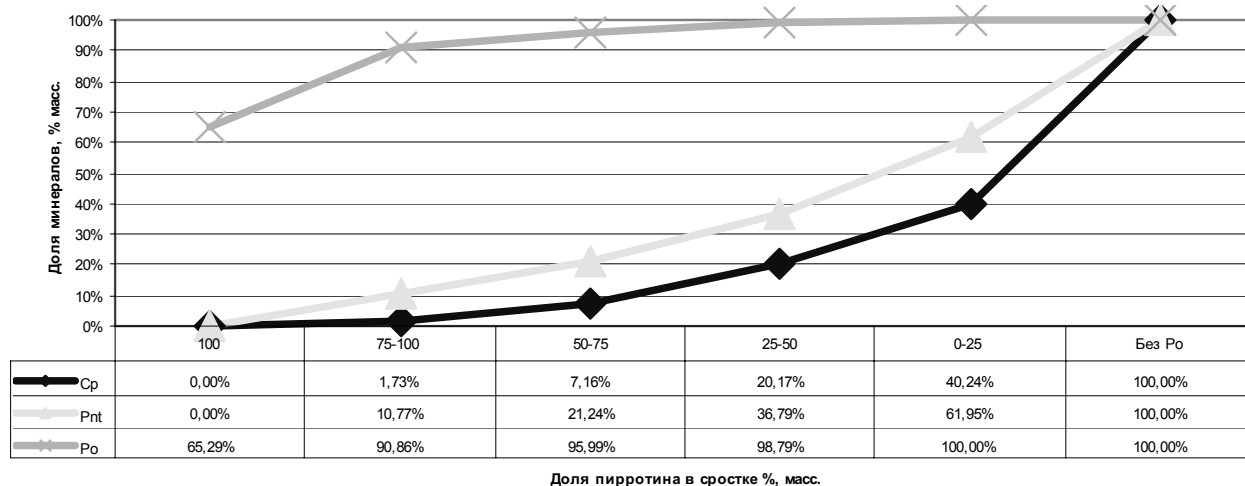


Рис.8. Кумулятивное распределение минералов по сросткам с разной долей пирротина

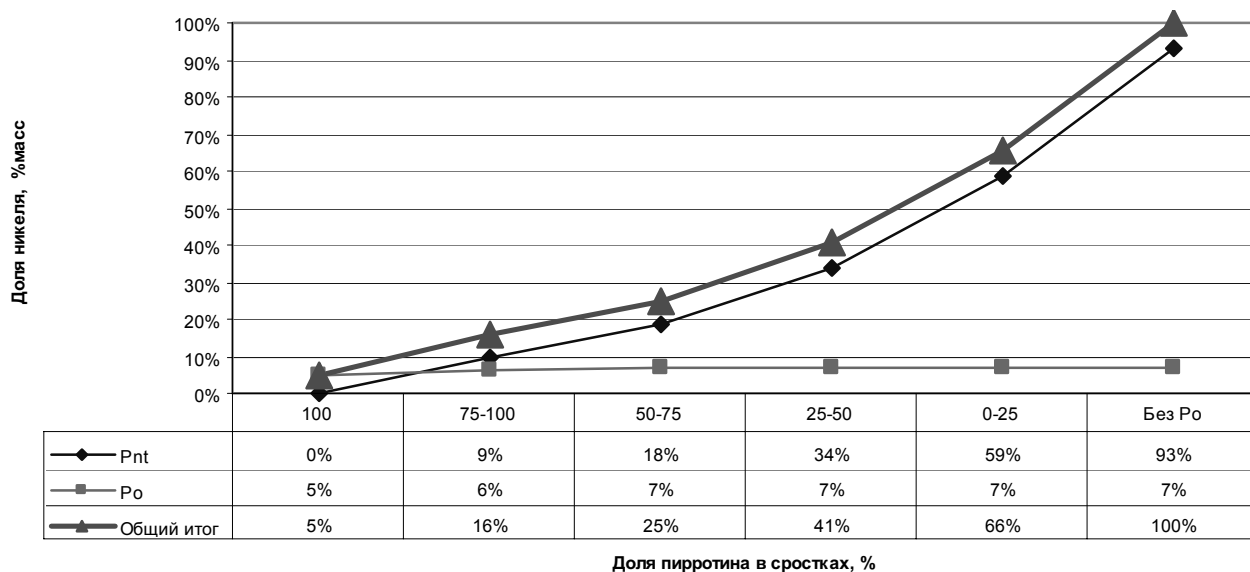


Рис. 9. Кумулятивное распределение никеля в руде по сросткам с разной долей пирротина

4. Прогнозные минералогически лимитированные кривые извлечения и содержания никеля и меди в селективных концентратах

Моделирование технологических показателей выполнено для селективной схемы обогащения с последовательным получением медного, затем никелевого концентрата [1].

4.1. Моделирование медного концентрата

Медный концентрат (рисунок 10) с минимальным разубоживанием, когда в концентрат распределяются свободные зерна халькопирита и его богатые сростки с долей 75–100% масс., имеет содержание Cu 26.7% при извлечении 84%.

Однако если задать содержание меди в медном концентрате 30%, то в данной пробе извлечение составит 70% и разубоживание концентрата снизится.

Частные кривые по отдельным классам крупности показывают, что при несколько более тонком измельчении возможно улучшение показателей медного концентрата.

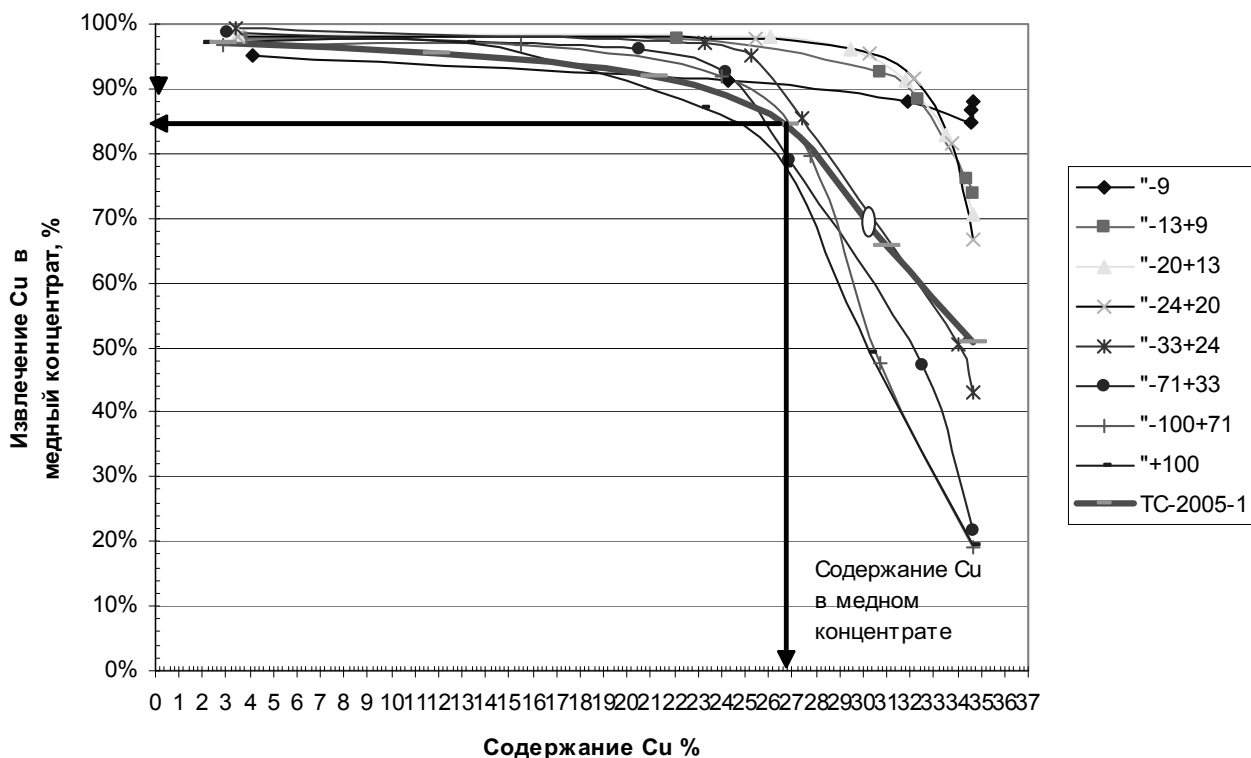


Рис.10. Извлечение меди в медный концентрат по фракциям крупности

4.2. Моделирование никелевого концентрата

Никелевый концентрат (рисунок 11) с минимальным разубоживанием, когда в концентрат распределяются свободные зерна пентландита и его богатые сростки с долей 75–100% пентландита, имеет содержание 28.7% при извлечении 59%. Технологически по результатам изучения раскрытия пентландита такой концентрат практически не достижим.

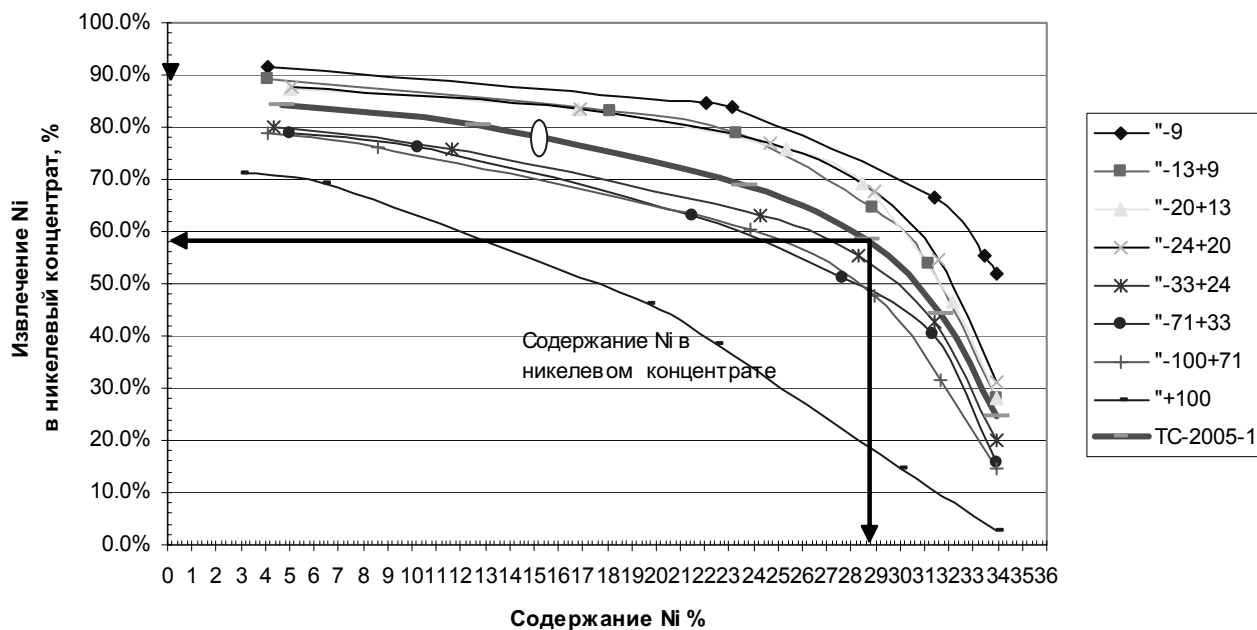


Рис.11. Извлечение никеля в никелевый концентрат по фракциям крупности

Однако если задаться содержанием никеля в концентрате 15%, то теоретически возможно получить извлечение в концентрат на уровне 88%. В таком концентрате имеет место существенное разубоживание, поскольку он будет включать в себя зерна с долей пентландита от 0 до 25% масс. и 25–50% масс.

Расчетные результаты показывают, что повышение содержания никеля в концентрате приводит к резкому снижению извлечения и неэффективно. Доизмельчение до тонких классов -24+20мкм может повысить извлечение в концентрат на 10–12%.

Выводы

Методика минералогического моделирования может быть применена для оценки технологических свойств руд различного состава.

Минералогическому моделированию предшествует скрупулезная работа по изучению вещественного состава руды в аншлифах и изучения химического состава минералов методом микрорентгеноспектрального анализа. Последнее необходимо для контроля минералогического анализа посредством сравнения данных химического состава сырья, рассчитанных теоретически и полученных непосредственно из химической лаборатории.

Изучение раскрытия главных рудных минералов позволяет по теоретическим данным обоснованно подойти к выбору рациональной крупности первичного измельчения руды.

Представленная методика позволяет рассчитывать идеальные минералогически лимитированные показатели обогащения руд. Безусловно, результаты практических испытаний по конкретным схемам будут ниже, чем теоретические показатели. Однако, если практическая кривая содержания/извлечения находится ниже теоретической кривой, но в целом повторяет ее, выбранную схему обогащения и ее параметры следует считать оптимальной. В том случае, если теоретическая и практическая кривые окажутся разнонаправленными, следует откорректировать либо саму схему обогащения, либо параметры схемы (реагентный режим, введение дополнительных перемешиваний и т. д.) [2,3].

В настоящее время имеется опыт применения данной методики для медно-никелевых руд по усовершенствованию схемы переработки и комплексных медно-железных руд, для которых разрабатывается новая схема обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов В.И., Козырев С.М., Лялинов Д.В. Выполнение минерало-технологического анализа продуктов, отобранных при Генеральном опробовании ТОФ, с целью разработки рекомендаций по повышению качества концентратов и снижению потерь металлов. /Отчет НИР ОАО «Институт Гипроникель», СПб, 2003, 207с
2. Ламберг П., Лишо Ю. Использование анализа изображения при моделировании флотации сульфидных медно-никелевых руд / Обогащение руд — Цветные металлы, № 6, 2001 г., сс. 44–47.
3. Сотка П., Ламберг П. Прикладная минералогия в обогащении полезных ископаемых / Обогащение руд — Цветные металлы, № 6, 2001 г., сс. 33–36.

ИЗУЧЕНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ РУД НА СТАДИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ

Бубнова Т.П., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В.

ИГ Кар.НЦ РАН, г.Петрозаводск, bubnova@krc.karelia.ru

При рассмотрении геологического объекта (месторождения) на стадии поисково-оценочных работ основное внимание уделяется всестороннему изучению его геологических характеристик и минералогических особенностей с построением геолого-технологической модели, чтобы получить необходимые исходные данные для составления технико-экономического обоснования на проведение последующей стадии работ. Технологическая минералогия играет в этом процессе ведущую роль, давая ответ на практический вопрос о типоморфных особенностях минералов (целая гамма необходимых параметров химических, физических и механических свойств в зависимости от поставленных задач, что позволяет сделать выбор наиболее оптимальной схемы обогащения минерального сырья.

Технологическая минералогия имеет дело с выражением вышеупомянутых свойств в количественном выражении. Таким образом, после всестороннего анализа объекта появляется возможность оценить его перспективы на стадиях, предшествующих геологоразведочным работам.

В своей обобщающей работе В.М.Изоитко обобщила факторы, непосредственно влияющие на технологический процесс [1]:

- качественно-количественный состав исходной руды;
- структурно-текстурные особенности
- физические свойства;
- состав самих минералов;
- форма нахождения полезных компонентов;
- присутствие минералов, близких по свойствам, используемым в технологии обогащения;
- наличие «активных» минералов (легко растворимых или сильно сорбирующих реагенты и тонкораздробленных).

Немаловажно изучение характеристик, не влияющих непосредственно на процесс переработки, но определяющих типоморфные особенности руд и минералов и сказывающихся через факторы первой группы на технологических процессах:

- унаследованность состава руд от вмещающих пород,
- характер и степень тектонической деятельности (крепость и степень ошламования руд, окисленность поверхности минералов и др.).

В лаборатории геологии, технологии и экономики минерального сырья Института геологии проводятся многоплановые работы по изучению индустриальных минералов Карелии на стадиях, предшествующих поисковым или разведочным работам. В последние годы технолого-минералогические исследования охватывали ряд новых и перспективных объектов. Среди них можно отметить месторождения и проявления индустриальных минералов Тикшеозерско-Елетьозерского раннепротерозойского щелочного интрузивного комплекса (Лоухский район) – апатитсодержащие карбонатиты и пироксениты, нефелиновые сиениты, оливиниты. На территории Лоухского рудного района также изучались анортозиты Котозерского массива, мусковитовые кварциты, гранатсодержащие породы архейской зеленокаменной Хизоваарской структуры. На основе исследований индустриальных минералов выявляются области нетрадиционного их использования, что расширяет сферу возможного потребления.

При рассмотрении геологического объекта (месторождения) в плане его последующего промышленного освоения, первостепенное внимание уделяется изучению качественно-количественного состава. Соответственно, устанавливаются закономерные количественные связи между вещественным составом и показателями переработки. Наглядно это представляется в виде таблиц, диаграмм, графиков. Наличие зависимостей подтверждается корреляционным анализом, а привлечение методов математической статистики позволяет установить и выразить в виде уравнений зависимость между изучаемыми факторами и прогнозировать, соответственно, технологические параметры. В качестве примера такого подхода можно рассмотреть апатитсодержащие карбонатиты Тикшеозерского массива, поскольку для этого объекта накоплен достаточно большой объем данных по вещественному составу. На рисунке 1 показана определенная взаимосвязь между основными породообразующими оксидами и технологическими показателями.

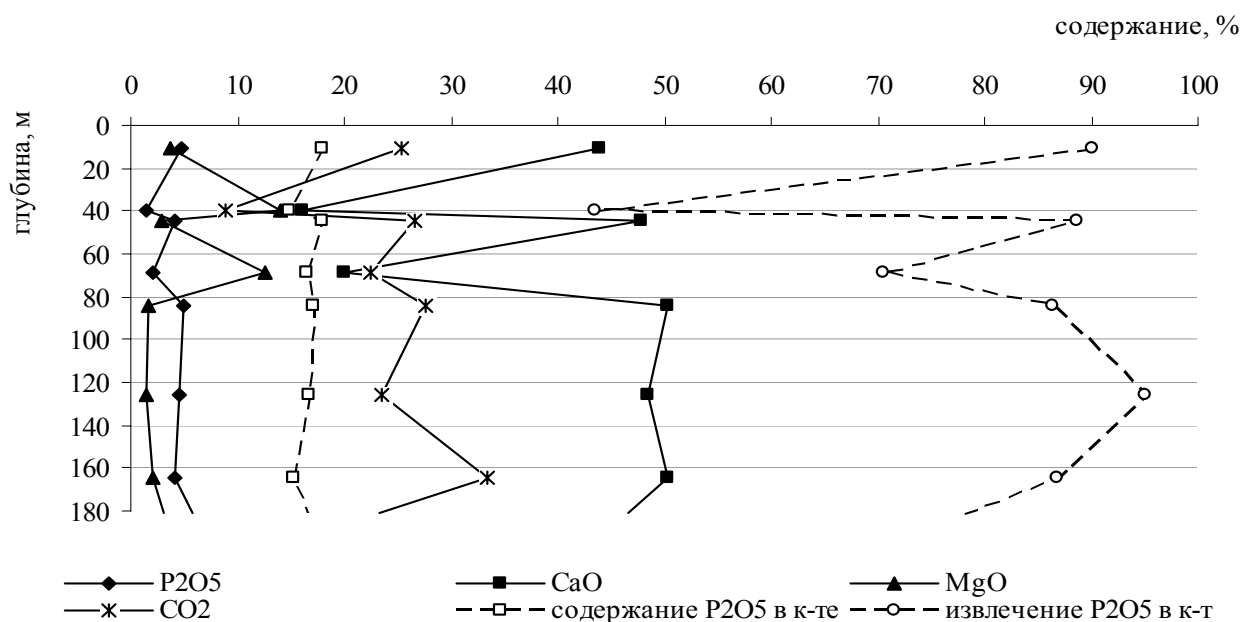


Рис. 1 Вариации содержания породообразующих оксидов и технологических показателей апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского массива (скв.146)

Результаты факторного анализа при изучении апатитсодержащих карбонатитов Тикшеозерского массива представлены в виде распределения всех проб в плоскости первых двух главных компонент (рис. 2). Исходный массив данных состоит из количественных показателей химического состава породы и показателей технологического передела. В данном случае после математической обработки возможно выделение двух групп проб, располагающихся в пределах влияния различных факторов.

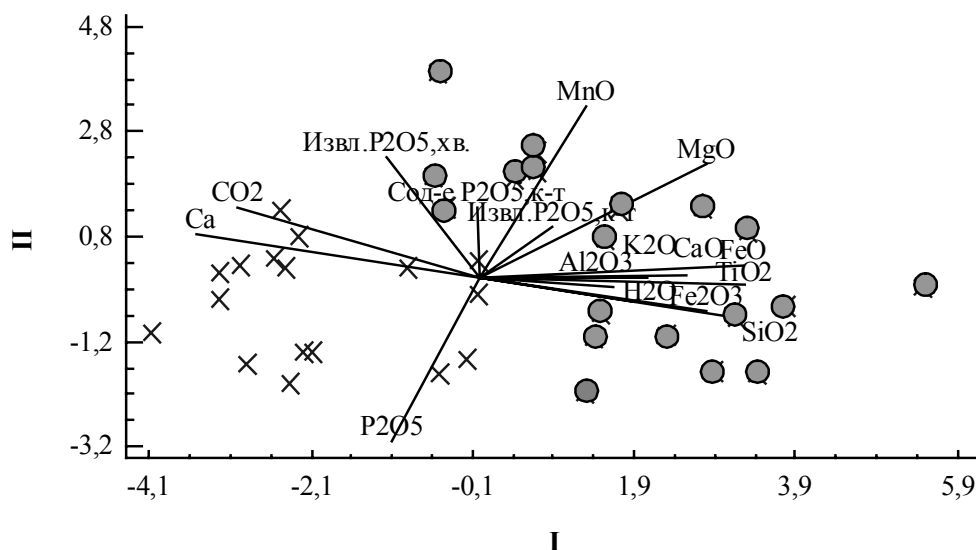


Рис. 2. Классификация апатит-карбонатитовых проб по вещественному составу и технологическим показателям в плоскости I-II главных компонент

При попытке составления статистической модели для отдельных технологических показателей можно использовать уравнения прогнозирования различных видов (линейной регрессии – простые и многофакторные, нелинейной – полиномиальные, логарифмические и др.) с использованием прикладной программы STATGRAPHICS Plus (Version 5). В качестве независимых переменных вводились значения содержаний оксидов в исходной руде. Исследование связи между извлечением апатита в концентрат и содержанием P_2O_5 в исходной породе показало, что в целом по массиву ни один вид уравнения не удовлетворяет требованиям прогнозирования (табл. 1). Коэффициент детерминации (R^2) слишком низок и вследствие недостаточной информационной способности модели, использование ее нецелесообразно. При составлении же уравнений прогнозирования для выделенных групп проб возможно построение статистически значимых моделей в 90% доверительном интервале.

Таблица 1

Уравнения прогнозирования извлечения апатита из различных групп апатит-карбонатитовых проб

Группа проб	Номер уравнения	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2	Стандартная ошибка прогноза, σ
1	1	$\varepsilon = 634,69 - 45,82Al_2O_3 + 17,69Fe_2O_3 - 48,00FeO - 6,56MnO - 5,04MgO - 10,92CaO + 34,32K_2O - 15,29P_2O_5 + 2,56CO_2$	99,98	0,29
2	2	$\varepsilon = 205,42 - 399,93P_2O_5 + 234,96P_2O_5^2 - 1,62P_2O_5^3 + 3,82P_2O_5^4$	67,44	8,24
	3	$\varepsilon = 37,66 + 4,20TiO_2 + 9,06FeO - 90,85H_2O - 10,54P_2O_5$	80,01	5,50
Весь массив	4	$\varepsilon = -72,04 - 0,78SiO_2 + 55,95TiO_2 - 0,27Al_2O_3 - 0,37Fe_2O_3 + 2,29FeO - 103,33MnO + 0,59MgO + 3,05CaO + 22,93Na_2O + 3,52K_2O - 66,69H_2O - 4,83P_2O_5 - 0,57CO_2$	54,60	9,72

Структурно-текстурные особенности являются одними из главных диагностических и классификационных признаков горной породы и дают представление о степени развития, размерах отдельных минералов и их взаимоотношении между собой.

Так, изучение структурно-текстурных и минералогических особенностей кварц-мусковитовых пород (мусковитовых кварцитов) месторождения Восточная Хизоваара позволяет выделить несколько типов пород, отличающихся по минеральному составу (табл. 2), степени метасоматической переработки и содержанию мусковита:

- I. Слабомусковитизированная порода (рис. 3-а);
- II. Метаандезиты, интенсивно метасоматизированные (рис. 3-б);
- III. Мусковитовые кварциты (рис. 3-в).

Таблица 2

Средний минеральный состав основных типов пород

Тип породы	Содержание, %								
	мусковит	биотит	кварц	плагиоклаз	кианит	сульфиды	турмалин	рутил	ставролит
I	1,35	2,60	58,80	13,90	8,95	6,40	0,15	0,80	0,15
II	14,61	1,84	56,25	14,95	6,35	4,08	0,45	0,52	0,36
III	25,37	0,72	53,11	9,43	7,03	2,93	0,63	0,59	0,08

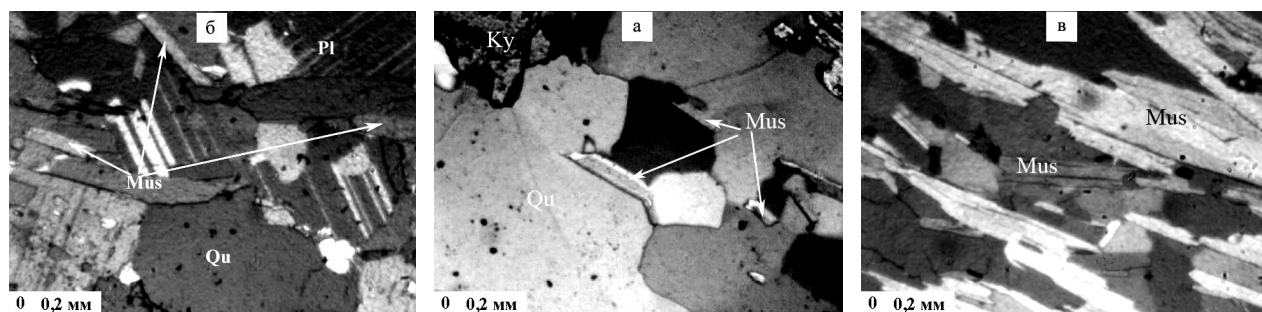
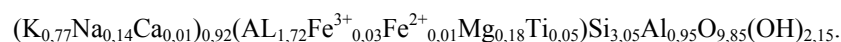


Рис. 3. Тектурно-структурные особенности и вариации минерального состава различных типов мусковит-содержащих пород месторождения Восточная Хизоваара (фото шлифов):

а – I тип: кварц-кианитовая порода с содержанием мусковита 2-3% (николи +), б – II тип: метасоматически измененная порода с содержанием мусковита 5-15% (николи +), в – III тип: мусковитовые кварциты с содержанием мусковита 20-35% (николи +), Mus – мусковит, Ky – кинит, Qu – кварц, Pl – плагиоклаз

Изучение структурно-текстурных и минералогических особенностей позволяет установить *форму нахождения полезных компонентов*. С увеличением степени метасоматической переработки породы наряду с изменением минерального состава формируются новые генерации или подвергается определенным воздействиям мусковит первого поколения. Например, биотит замещается мусковитом с выносом железа, образуется переходная ассоциация биотит-мусковит, далее мусковит в значительной степени освобождается от части железа. Новая генерация мусковита представляет собой более крупнозернистую разновидность с равномерной интерференционной окраской. Происходит образование мусковита в локализованных участках в виде линз, гнезд, прослоев. В результате наложенных процессов, оторванных во времени, появляется мусковит со своими типоморфными особенностями. Новые приобретенные свойства мусковита являются фактором (*состав минерала*), который непосредственно влияет на технологический процесс. В целом, мусковит данного объекта характеризуется постоянством состава в отношении основных формульных элементов и значительными вариациями изоморфных элементов. Усредненная кристаллохимическая формула его близка к теоретической и имеет следующий вид:



Получение мусковитового продукта возможно с использованием гравитационного или флотационного методов обогащения. Анализ флотационных концентратов показал существенные вариации содержания окислов железа, марганца магния и кальция для различных типов пород (табл. 3). Повышенное содержание железа отмечается во II типе пород (где содержание мусковита 5-15%), что связано с присутствием переходной разновидности биотит-мусковит (осветленный биотит) в породе, которая попадает в концентрат.

Таблица 3

Химический состав мусковитовых концентратов из различных типов пород

Тип породы	Содержание оксидов,%														Выход мусковито вого концентрата
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	ппп	Pb	As	
I	45,73	0,79	31,52	0,36	0,26	0,07	5,96	0,22	0,78	9,64	0,06	4,20	0,00061	<0,001	8,80
II	47,02	0,74	33,77	0,70	0,34	0,04	1,60	0,28	1,02	9,51	0,10	4,52	0,00368	<0,001	12,04
III	47,37	0,61	34,89	0,47	0,14	0,02	1,21	0,07	1,22	9,11	0,19	4,60	0,00292	<0,001	15,58
среднее	47,01	0,70	33,94	0,59	0,26	0,03	1,90	0,20	1,06	9,38	0,13	4,52	0,0031	<0,001	12,86
Кэф. вариации	0,02	0,99	0,03	0,73	0,60	0,78	0,53	0,75	0,21	0,07	0,41	0,07	0,047	<0,001	

Существенное влияние на технологические показатели оказывает характер срastания мусковита с породообразующими минералами. В данном случае благоприятными для обогащения являются параллельные срastания мусковита с кварцем и другими минералами, определяющие слоистую, сланцеватую текстуру.

Физические свойства (оптические, люминесцентные, электрические, термические, механические). Имеют определяющее значение, если минералы обладают ярко выраженной контрастностью свойств (как правило, магнитные, люминесцентные, плотность). В большинстве случаев физико-механические свойства непосредственно влияют на процессы дезинтеграции.

Одним из таких показателей является микротвердость. В отличие от показателя твердости по шкале Мооса (где относительная твердость определяется путём царапания эталоном поверхности испытываемого объекта), микротвердость отражает способность того или иного материала сопротивляться постоянно вдавливаемой нагрузке и является величиной, характеризующих количественную оценку твердости минерала. [2]. Помимо того, микротвердость можно использовать в качестве типоморфного признака при характеристике генетического типа месторождения, генераций минералов и типов руд, изучении истории минеральных индивидов [3].

В связи с тем, что показателем различной степени измельчаемости отдельных минералов является шламообразование, анализ гранулометрического состава продуктов обогащения можно связывать непосредственно с прочностными характеристиками минералов. В целом избыточное образование мелких частиц отрицательно сказывается на дальнейших процессах обогащения, вследствие налипания шламов на частицы полезного компонента. В результате уменьшается селективность разделения. В данном случае анализ изучения результатов опытов обогащения и средней микротвердости кальцита представлен в виде аппроксимирующих графиков (рис. 4). Тренды, проведенные по точкам функций для выхода кальцитового концентрата извлечения кальцита, имеют параболический вид. Нисходящая ветвь графиков может быть связана с недостаточным раскрытием сростков, обладающих большей микротвердостью (соответственно не достигается необходимая тонина помола), что отрицательно сказывается на флотационном процессе, снижая его качество. С увеличением микротвердости кальцита, соответственно, уменьшается его содержание в шламах. Пополнение мелко-размерного продукта происходит за счет менее твердых минералов, которые в большей степени переизмельчаются.

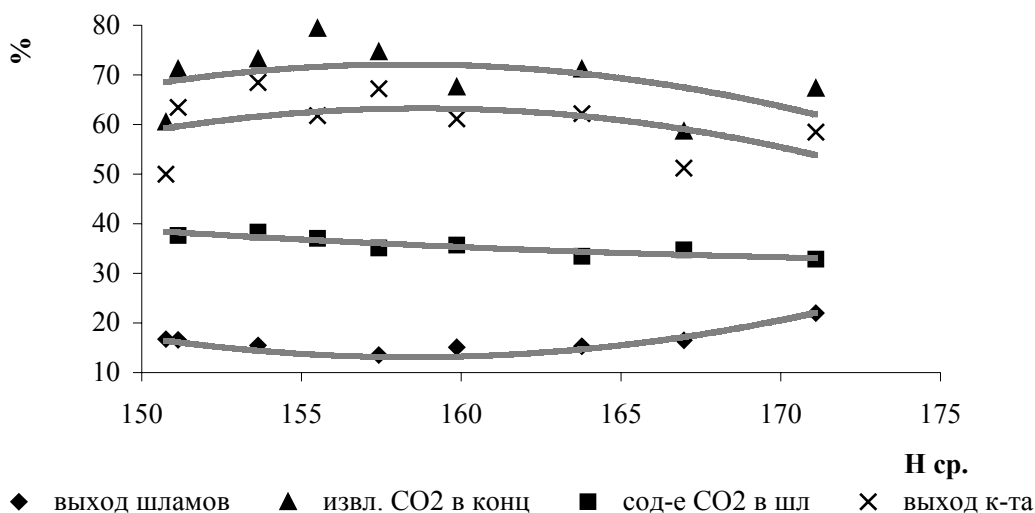


Рис. 4. Зависимость технологических показателей обогащения от средней микротвердости кальцита

Присутствие минералов, близких по свойствам, используемым в технологии обогащения. Проблема их разделения решается подбором оптимальной схемы обогащения, как правило, с использованием флотации.

К одному из востребованных промышленных минералов относится гранат. За последние годы выявлен ряд месторождений и рудопроявлений граната, расположенных, главным образом, в Лоухском районе (северная Карелия). Проявление Высота-181 является одним из таких объектов, для которого определены прогнозные ресурсы в 12 млн. тонн и выполнены работы по изучению обогатимости с наработкой опытных партий гранатовых концентратов. Гранат представляет собой сквозной минерал для практически всех парагенетических ассоциаций данной неоднородной по составу толщи (табл. 4).

Ставролит-кианит-гранатовый и кианит-гранат-слюдистый сланцы характеризуются примерно одинаковой обогатимостью и могут перерабатываться по единой технологической схеме. Присутствие в руде амфиболитов будет резко снижать качество гранатового концентрата. Поскольку в данном случае трудности обогатительных процессов связаны с весьма тонкой вкрапленностью примесных минералов в зернах граната, присутствием амфибола, ставролита в исходной руде (обладающих близкими с гранатом магнитными, флотационными и гравитационными свойствами).

Статистические характеристики минерального состава природных типов пород месторождения Высота-181

Минерал	Природные типы пород								
	Ставролит-кианит-гранатовый сланец			Кианит-гранат- слюдястый сланец			Гранатовый амфиболит		
	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее	макс	мин	среднее
Гранат	35,5	13,40	21,50	25,50	13,20	20,35	16,00	12,00	13,8
Ставролит	13,00	0,00	4,73	5,10	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00
Кварц	47,50	31,70	42,00	61,20	41,20	49,67	24,00	8,10	12,2
Плагноклаз	8,00	0,20	4,13	16,60	0,00	9,77	7,90	2,90	5,00
Мусковит	2,10	0,50	1,50	4,70	0,10	1,97	0,01	0,00	0,0005
Биотит	1,50	0,10	0,63	5,60	0,10	3,12	0,50	0,30	0,40
Кианит	30,00	14,40	22,47	18,70	0,00	11,45	0,00	0,00	0,00
Амфибол	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	69,35	58,41	67,8
Рудные	4,20	1,20	2,33	1,50	0,20	0,92	0,70	0,00	0,50
Хлорит	0,40	0,10	0,27	0,10	0,10	0,10	0,50	0,10	0,30
Турмалин	0,20	0,00	0,07	0,60	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00
Рутил	0,70	0,10	0,40	0,90	0,10	0,45	0,10	0,00	0,00
Карбонат	0,30	0,00	0,13	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10

Таким образом оценка промышленных минералов сегодня должна обязательно включать комплекс минералого-технологических задач по определению дальнейших технологических работ, связанных с опытами по обогащению.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. Наука, Спб, 1997. – 581 с.
2. *Лебедева С.И.* Микротвердость минералов. М., 1977, 118 с.
3. Типоморфизм минералов и его практическое значение. Недра, М., 1972, 260 с.

РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ГЕОЛОГО-ПРОГНОЗНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТИПОВ РУД И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Мелентьев Г.Б.

НИЦ «Экология и промышленная энерготехнология»
Объединенного Института высоких температур
(ОИВТ) РАН, г. Москва

Редкометалльные месторождения гранитовых формаций, представленные различными типами редкометалльных пегматитов и гранитов, являются основными источниками собственно танталового (с ниобием), литиевого и рубидий-цезиевого сырья с сопутствующими бериллиевым и оловорудным. За рубежом редкометалльные пегматиты интенсивно разрабатываются как промышленным способом, так и с применением ручной рудоразборки и селективной добычи редкометалльного и наиболее ценного нерудного сырья [1]. В России в условиях «переходного периода» эксплуатация редкометалльных пегматитовых месторождений временно прекращена, а получение собственно танталовых и попутных оловянных концентратов из руд редкометалльных гранитов Этыкинского месторождения, предусмотренное программой «ЛИБТОН» Минатома, оказалось нерентабельным из-за низких показателей обогатимости этого сырья, что ранее было доказано практикой эксплуатации подобных же руд Орловским ГОКом (Забайкалье). В то же время в нашей стране десятилетиями не осваиваются крупные разведанные месторождения редкометалльных пегматитов на Кольском п-ве, в В. Саянах и ЮВ Тыве, прежде всего, в связи с расположением их в труднодоступных районах. В странах СНГ, с одной стороны, приостановлена деятельность Белогорского ГОКа (В. Казахстан), профилированного в бывшем СССР на выпуск танталовых концентратов с сопутствующими бериллиевыми, оловянными и нерудными (полевошпатовыми, включая к.п.ш., мусковитовыми и кварцевыми), а с другой – так же как и в России, не осваиваются меньшие по прогнозируемым ресурсам, но качественные месторождения редкометалльных пегматитов Узбекистана и Украины [1, 2].

Таким образом, проблема прогнозирования, поисков и перспективной оценки новых месторождений редкометалльного пегматитового сырья представляется весьма актуальной как для России, так и других стран СНГ, прежде всего, на территориях со сложившейся ресурсодобывающей инфраструктурой (Кольский регион, В. Казахстан, Узбекистан, Украина и др.), в перспективных и легкодоступных рудных районах (Карелия) и на территориях нового строительства ж/д магистралей, нефте- и газопроводов, топливно-энергетических

комплексов (юг Сибири, Якутия и др.). В то же время очевидно, что *возможности* обнаружения *новых* редкометальных *месторождений* на дневной поверхности *традиционными* способами ГРП на *освоенных* территориях и, прежде всего, в районах действующих ГОКов *крайне ограничены*. Поэтому эффективность ранних стадий ГРП все в большей степени будет определяться использованием опережающего комплекса методов локального (1:50000 – 1:10000) прогнозирования месторождений и рудных тел, в том числе – не выходящих на дневную поверхность, в пределах известных и новых полей редкометальных пегматитов, а также возможностями оперативной дифференцированной оценки продуктивности пегматитовых проявлений методами малообъемного минералого-технологического картирования.

Фундаментальные основы и рациональный комплекс методов локальной прогнозной оценки перспективности пегматитовых полей

Фундаментальные основы для разработок этих методов применительно к месторождениям редкометальных пегматитов и гранитов были заложены учением К.А. Власова о факторах редкометального пегматитообразования и созданием его последователями принципиально новых их классификаций с использованием *количественных* классификационных признаков и способов в отличие от преимущественно *качественных* и во многом умозрительных, применявшихся до 50-60-х годов при создании так называемых «генетических» классификаций. Известные положения К.А. Власова о пегматитах как фациях и фазах соответствующих гранитных интрузий и дифференциации пегматитообразующих расплавов в процессе внедрения в приоткрывающиеся рудовмещающие трещины пород кровли сыграли роль «спускового механизма» в интенсификации изучения в 1965-85 гг. специалистами ИМГРЭ всех проявлений пространственно-генетической зональности и расслоенности пегматитовых полей, жильных серий и конкретных жил, в обосновании сингенетичности и одноактности редкометальных пегматитовых инъекций [3]. В соответствии с новой концепцией, обоснованной К.А. Власовым, пегматитовый расплав представляет собой не межкристалльную жидкую фазу в понимании А.Е. Ферсмана, а остаточную часть магмы, обособленную и экранируемую породами кровли в апикальных зонах и выступах интрузий. В то же время комплексное пространственно-генетическое изучение магматогенно-рудных систем «гетерогенные гранитные интрузии – безрудные сателлитово-жильные расслоенные фации гранит-аплит-пегматитов – *редкометальные* пегматитовые шлировые и жильные фации (*руды*) – экзоконтактные фации измененных вмещающих пород (эндогенные ореолы и редкометальные слюдиты)» в различных регионах СССР на объективной геолого-структурной, петро-геохимической и количественной минералого-геохимических основах позволили установить и иллюстрировать картографическими и различными аналитико-графическими методами взаимосвязь между всеми фациальными составляющими этих систем, представляющих собой различно специализированные поля или *гомологические ряды* редкометальных гранитных пегматитов [4]. При этом в пределах редкометальных пегматитовых инъекций, образующих жильные серии и поля, фиксируются сходные проявления пространственной (вертикальной) зональности и объемной расслоенности на устойчивые минерально-парагенетические комплексы (зоны) и их ассоциации (типы пегматитов), которые в определенной последовательности сменяют друг друга по мере удаления от источника («материнских» гранитов). В этом же направлении закономерно повышается их редкометальная продуктивность. Все разнообразие изученных к настоящему времени полей и представляющих их типов редкометальных пегматитов, образующих зональные гомологические ряды, а также их гипабиссальных аналогов-редкометальных гранитов, с основными параметрами наиболее ценного танталового оруденения приводятся в авторском многофункциональном классификаторе [4]. При ее составлении использован двойной принцип *количественной* классификации широкого разнообразия редкометальных пегматитовых полей, месторождений, рудных тел, слагающих их зон и минерально-парагенетических комплексов: по преобладающим минералам и ведущей минералого-геохимической специализации (типам оруденения). Очевидно, что различия в последней находят отражение и в типохимических особенностях состава как породообразующих, так и акцессорных минералов, что позволяет использовать эти особенности и их параметры в прогнозно-поисковых целях.

В процессе изучения минералого-геохимической специализации и пространственно-генетической зональности редкометальных пегматитовых полей и других месторождений гранитовых формаций Средней Азии в условиях хорошей обнаженности в глубоких вертикальных врезках, а также вскрытия горными выработками и скважинами разведываемых и эксплуатируемых месторождений редкометальных пегматитов (В. Казахстан) и гранитов (В. Забайкалье), автором были выявлены и детально задокументированы примеры как непосредственной связи пегматитов с «материнскими» фациями гранитных интрузий, так и фациальной изменчивости их состава и строения в направлении внедрения. При этом впервые установлены «расщепления» зональных жил во фронтальной части инъекций на самостоятельные, согласные или, реже, поперечные жилы-апофизы, представленные контрастными по составу и строению минерально-парагенетическими комплексами соответствующих им зон [4].

В направлении внедрения зональное строение редкометальных пегматитовых инъекций, как и выступов-апофиз в породы кровли редкометальных фаций гранитов, осложняется участковой и ритмичной полосчатостью, причем синхронно с усложнением химического состава этих поликомпонентных остаточных обра-

зований – за исключением их непосредственных выклиниваний, представленных кварцевыми жилами и штокверками, содержащими переменные количества альбита, мусковита, железисто-фторидно-литиевых слюд и касситерита. Эти данные полевых исследований не могут быть интерпретированы иначе как проявления внутренних, физико-химических и синергетических свойств самих расплавов, структурирование которых в условиях температурного градиента при внедрении по-видимому осуществляется самопроизвольно и многократно.

С использованием этих, а также экспериментальных данных, включая специальное изучение в надкритической области состояния и свойств фторидно-литиевых щелочноалюмосиликатных систем, моделирующих редкометалльные пегматитообразующие расплавы, автор пришел к выводу о проявлениях в них *многопорядковой несмесимости* (immiscibility) в условиях температурного градиента при внедрении как ведущего фактора дифференциации расплавов с избыточными компонентами [5, 6, 7]. Разработанная нами принципиально новая *магматогенно-ликвационная* концепция и модель редкометалльного рудообразования обосновывает естественную пространственно-генетическую связь между всеми фациально-инъекционными производными гетерогенных гранитных интрузий (от источника до рудных тел), что позволяет использовать в прогнозно-поисковых целях все проявления специализации и объемной зональности этих неравновесных и саморазвивающихся магматогенно-редкометалльных систем, которые отражены в геофизических и геохимических аномалиях, структурах и специфике состава вмещающих пород и, наконец, в рельефе, т.е. представлены геохимическими «концентрами» и конкретными морфоструктурами.

С использованием этих фундаментальных основ и закономерностей локализации редкометалльных оруденений гранитовых формаций нами разработаны и апробированы на объектах поисков, разведки и эксплуатации следующие *методы* крупномасштабного и детального *прогнозирования, поисков и перспективной оценки* редкометалльных пегматитов и гранитов [4]:

- аналитико-графический, позволяющий в жестких системах координат петрохимических диаграмм типа $A - Si - Al - \Sigma щ (Na+K+Li+Rb+Cs) - \Sigma ф (Fe+Ti+Mg+Mn+Ca)$ и типа $B - Al - \Sigma ф (Na+Li) - K$ различать специализацию и изображать пространственно-генетическую зональность естественных гомологических рядов редкометалльных пегматитовых полей, их гипабиссальных аналогов – редкометалльных гранитных интрузий и излившихся аналогов – редкометалльных стекол («онгонитов»); рекомендовано их использование в качестве эталонных палеток для прогнозирования ожидаемого типа редкометалльного оруденения по результатам 10-15 силикатных анализов безрудного гранит-пегматит-аплитового комплекса;

- вариационно-геохимический, позволяющий прогнозировать ожидаемые уровни концентрации цезия и тантала в пегматитовых полях с ведущим литиевым орудением на стадиях поисков и оценки с использованием обратной зависимости содержаний этих элементов от величины отношения $SiO_2/\Sigma R$, характеризующего относительную вязкость пегматитообразующих расплавов, где R – остальные компоненты силикатных анализов пегматитовых тел;

- морфоструктурный, используемый для прогнозирования редкометалльных месторождений, не выходящих на дневную поверхность («слепых» и погребенных), оценивать уровни эрозионного среза зональных рудных полей и месторождений и осуществлять прогнозирование и оценку редкометалльных россыпей;

- шлихо-геохимический, рекомендованный для прогнозирования, поисков и перспективной оценки различных типов месторождений пегматитов и гранитов, в том числе – по ассоциациям минералов тяжелой фракции, специфике состава касситеритов и вольфрамитов из жильно-штокверковых надинтрузионных зон, по их же составу – из россыпей, и, наконец, для обнаружения и оценки перспективности россыпных месторождений по ассоциациям и специфике состава минералов тяжелой фракции, характерных для тех или иных типов редкометалльных пегматитов и гранитов;

- ореольно-геохимический, позволяющий оконтуривать эндогенные геохимические аномалии на поисковых площадях, ранжировать их по степени перспективности на тот или иной тип ожидаемого редкометалльного оруденения с использованием мажоритарных рядов выявленных в ореолах элементов и локализовать поиски путем интегрированного использования геохимических карт.

Системный анализ пространственно-генетической связи редкометалльных оруденений с гранитами позволил установить взаимоисключающее формирование промышленных месторождений редкометалльных пегматитов и редкометалльных гранитов в пределах одного «геохимического концентра», т.е. соответственно специализированного гранитного плутона, рудного узла или пояса [8]. Эта эмпирическая закономерность объясняется различиями в глубинности формирования редкометалльных пегматитов (на глубине 3,5-6 км) и их гипабиссальных аналогов – редкометалльных гранитов (на глубине 1,5-2 км). Очевидно, что их излившиеся аналоги представлены редкометалльными стеклокристаллическими образованиями или стеклами. В частности, формационный анализ сложно дифференцированного Калба-Нарымского гранитного плутона (В. Казахстан), с центральной, глубоко вскрытой эрозией частью которого связаны поля и промышленные месторождения редкометалльных пегматитов, и его сателитово-лейкогранитового обрамления, с которым, как наименее эродированным, в основном, связаны кварцево-жильно-штокверковые проявления олова и вольфрама (вольфрамит), выполненный нами в 80-е годы, не только подтвердил эту эмпирическую закономерность, но и позволил про-

гнозировать отсутствие перспектив на обнаружение новых промышленно значимых месторождений редкометалльных пегматитов в соответствующей морфоструктуре В. Забайкалья, где, наоборот, преобладают разведанные и эксплуатируемые месторождения редкометалльных гранитов и проявления излившихся аналогов, аномально обогащенных цезием. С этих позиций в В. Казахстане, в сфере деятельности Белогорского ГОКа, специализированного на тантал, нами выделен целый ряд потенциально перспективных на обнаружение редкометалльных пегматитов и гранитов участков и, соответственно, новых поисковых площадей (с учетом взаимного исключения их месторождений, наличия потенциально «продуктивных» морфоструктур и широкого развития в их пределах кварцево- жильно-штоковерковых проявлений с касситеритом). Не следует забывать, что мелкие жильные апофизы, обогащенные кварцем и касситеритом, послужили прямым поисковым признаком на крупнейшее в мире литий-цезий-танталовое месторождение Берник-Лейк, представленное крупным полизональным телом редкометалльного пегматита, продуктивная часть которого оказалась перекрытой рыхлыми отложениями и залегающей под озером. С этих позиций для касситеритов из различных типов редкометалльных пегматитов и гранитов, а также других оловорудных формаций, составлена шкала минералого-геохимической индикации искоемых оруденений с использованием данных о содержаниях тантала и ниобия и их соотношений друг с другом – табл. №2 [4].

Методические особенности обогащения редкометалльных пегматитовых руд с учетом индивидуальных коэффициентов потерь при выделении мономинеральных фракций на концентрационных столах

Необходимость выделения мономинеральных фракций из малообъемных проб редкометалльных пегматитовых руд с использованием их предварительного обогащения на концентрационных столах обусловлена как задачами применения вышеуказанных минералого-геохимических методов для оценки и классификации пегматитов на ранних стадиях ГРП, так и задачами проведения минералого-технологического картирования продуктивных тел на их поздних стадиях, и, наконец, составления поминеральных балансов распределения редких и лимитируемых (с технологических и экологических позиций) микрокомпонентов при подготовке запасов редкометалльного сырья к утверждению в ГКЗ. Тем самым достигается возможность объективной дифференцированной оценки редкометалльных месторождений, представляющих их рудных тел и зон на весь комплекс содержащихся в них полезных компонентов в реально извлекаемых минеральных формах, что позволяет учитывать не только геологические, но и извлекаемые запасы, а также оптимизировать выбор технологических вариантов обогащения руд и минимизировать экологические последствия эксплуатации месторождений. Выделенные технологическим путем мономинеральные фракции не только позволяют оценивать *средний* минеральный *состав* различных типов руд, но и определять *типохимизм* породообразующих и акцессорных минералов, а также, в известной степени, судить о *качестве* будущей товарной продукции, т.е. минеральных концентратах.

В связи с этим в соответствии с разработанной в 50-60-х годах В.В. Ляховичем с сотрудниками методикой промывки проб гранитоидов на столе КЦ-30 был установлен единый для всех минералов тяжелой фракции поправочный коэффициент потерь за счет смыва 1,68 [9]. Затем для акцессорных минералов были определены индивидуальные коэффициенты извлекаемости, определяемые различиями в плотности [10]. Однако очевидно, что эти коэффициенты зависят не только от физических характеристик и свойств минералов, но и от типа пород, из которых они извлекаются.

В связи с этим нами экспериментально на лабораторном столе КЦ-30 были определены поправочные коэффициенты потерь различных минералов тяжелой фракции 4-х типов редкометалльных пегматитовых руд, достаточно контрастных по своему составу и качеству [11]. Детально изученные к сводному отчету с подсчетом запасов тантала и сопутствующих полезных компонентов руды Юбилейного месторождения (В. Казахстан), предназначенные для обеспечения сырьем Белогорского ГОКа бывшего Минцветмета СССР, представлены следующими типами редкометалльного пегматитового сырья:

- Микроклин-кварц-альбитовым с некондиционным Ta-Nb-Be-м оруденением
- Кварц-альбитовым с мусковитом, микроклином и рядовым Ta-м оруденением
- Альбит-кварц-сподуменовым с микроклином и рядовым Nb-Ta-м оруденением
- Микроклин-кварц-сподумен-альбитовым с лепидолитом, поллуцитом и комплексным (Li-Cs-Ta) оруденением.

При этом нижняя жила (Единая) в вертикальном разрезе месторождения включает первые два типа редкометалльного сырья, в то время как верхняя (ж. Юбилейная) – все 4 типа, среди которых основную ценность представляет последний, выполняющий осевую зону в верхних горизонтах центральной части жилы и обособления – на глубине (в плоскости падения) и ее флангах, подобных по составу ж.Единой. По всем типам сырья, представляющим собой устойчивые минерально-парагенетические ассоциации, задокументированные детальным картированием в поверхностных и подземных выработках в виде зон и обособлений, были отобраны пунктирной бороздой частные и затем составлены групповые пробы весом 30-60 кг. После дробления до 0,5 мм групповые пробы сокращались с отбором малых (М – 2 кг) и больших (Б – 15-20 кг) дубликатов, а также навески для химических анализов исходного состава.

Таблица 1

Содержания тантала и ниобия (в вес.%) в касситеритах различных типов месторождений и руд

Формации	Минералого-геохимические специализации месторождений и типы руд	Регион	Ta ₂ O ₅			Nb ₂ O ₅			Ta ₂ O ₅ / Nb ₂ O ₅
			от	до	среднее	от	до	среднее	
	Редкометалльные месторождения								
I. Редкометалльные пегматиты	1. Бериллиевые (Ta-Nb-Be) Мк-Аб с Мск	Забайкалье	—	—	2,814	—	—	1,312	2,14
	2. Литиевые Мк-Сп-Аб (незональные)	Вост. Сибирь	0,024	0,08	0,050	0,024	0,07	0,047	1,06
	3. Литий-оловянно-танталовые Мк-Аб с Мск	Казахстан							
	Li-Ta Мк-Аб с Мск и Сп								
	Ta-Sn Мск-Мк-Аб								
	↓ Ta Мк-Аб с Мск								
	Li-Cs-Ta Аб-Мк со Сп, Пт и Мск								
	4. Комплексные редкометалльные (Li-Cs-Ta) Мк-Аб с Мск, Сп и Лп (зональные)	Казахстан							
	Ta-Nb-Be Мк-Аб с Мск								
	Ta Кв-Аб								
	↓ Ta-Li Аб-Сп-Кв с Мск								
	Li-Cs-Ta Сп-Кв-Аб с Мск, Лп, Пл								
	5. Комплексные редкометалльные () Мк-Сп-Аб (незональные)	Вост. Сибирь							
Li Мк-Сп-Аб									
Li-Ta Мк-Сп-Аб									
↓ Li-Cs-Ta Мк-Сп-Аб									
Ta Аб и Мск									
6. Фтор-тантал-литиевые Лп-Фб (со Сп и без Сп)	Средняя Азия								
II. Редкометалльные граниты	1. Фтор-тантал-литиевые Ам-Аб с Лп	Забайкалье	1,0	4,0	2,5	—	—	0,91	0,5-5 (2,75) 0,20
	2. Фосфор-фтор-тантал-оловянно-титиевые Мк-Аб с Li-слюдами	Северо-Восток	—	—	0,75	—	—	3,75	
	Оловорудные месторождения								
III. Пневмато-гидротермальные жильные и штокверковые (надинтрузивные) образования	1. Полевшпат-касситеритовые	Вост.	0,12	0,62	0,347	0,187	0,553	0,362	0,93
	2. Кварц-касситеритовые	Забайкалье							
		Вост.	0,001	0,050	0,0170	0,050	0,290	0,088	0,1932
		Забайкалье							
		Приморье	0,018	0,035	0,0243	0,080	0,635	0,2667	0,091
		Якутия	0,012	0,12	0,052	0,005	0,177	0,107	0,486
		Чукотка	н/о	0,018	0,005	0,002	0,087	0,038	0,133
		Ц. Казахстан	0,10	0,31	0,16	0,080	0,92	0,434	0,3687
		Средняя Азия	—	—	0,52	—	—	1,00	0,052
		среднее для типа	0,001	0,31	0,051	0,002	0,92	0,301	0,17
	3. Топаз-касситеритовые	Вост.	0,047	0,053	0,05	1,02	1,60	0,21	0,04
		Забайкалье							
	4. Силикатно- и сульфидно-касситеритовые	Вост.	—	—	0,04	—	—	0,0188	2,13
	Забайкалье								

Примечание. Данные по оловорудным формациям заимствованы у И.Е. Максимюк, по комплексным редкометалльным пегматитам Вост. Сибири у Ю.И. Филипповой, остальные – авторские; стрелками показано направление зональности пегматитовых инъекций. Отношение Ta₂O₅/Nb₂O₅ в скобках – среднее.

Технологическая обработка отобранных дубликатов проб проводилась в лаборатории аксессуарных минералов параллельно по двум схемам. Большие дубликаты проб обрабатывались по методике, разработанной для изучения аксессуарных минералов гранитов, включающей промывку проб на концентрационном столе [11]. При обработке проб на столе получают четыре продукта: концентрат (серый шлик), промежуточный продукт, хвосты и шламы. Промежуточный продукт промывали еще раз, и в результате обработки он распределялся между концентратом и хвостами. Чтобы избежать потерь извлеченных редкометалльных и аксессуарных минералов концентрат перечистным операциям на столе не подвергали, а разделяли на тяжелую и легкую фракции в бромформе. Тяжелую фракцию шлика разделяли на 7-8 электромагнитных фракций. При обработке этих проб поддерживались постоянными следующие параметры работы стола: а) напор воды; б) крупность обрабатываемых проб (0,5 мм); в) выход концентрата 10-11% от веса промываемой пробы; г) ситовая характеристика (одинаковая дисперсность) обрабатываемых проб. Среднее ее значение составляло: класс -0,5+0,25 – 44,3%; класс -0,25+0,1 – 25,3%; класс -0,1+0,007 – 19,6%; класс -0,007 – 10,8%. Малые дубликаты групповых проб технологически обрабатывали по упрощенной схеме: их не промывали на концентрационном столе, а после обесшламливания (до крупности минералов 0,07 мм) разделяли в бромформе на тяжелую и легкую фракции, с последующим выделением электромагнитных фракций.

Количественно-минералогический анализ тяжелой фракции проводился под бинакулярным микроскопом в дорожках из 100-500, иногда 1000 зерен отдельно по каждому классу крупности (+0,25; -0,25 мм) всех электромагнитных фракций. При расчете исходного количества аксессуарных минералов в пробах учитывалась их плотность (удельный вес). Чтобы исключить случайные ошибки в определении состава и количества аксессуарных минералов редкометальных пегматитов, подсчет их во всех пробах, как и технологическая обработка проб, проводился одним исследователем.

Поправочные коэффициенты потерь (K) аксессуарных минералов при промывке проб на столе КЦ-30 рассчитывали как отношения их концентраций в малой (М) и большой (Б) пробах, т.е. в непромытой и в промытой частях групповой пробы (11).

Для расчета максимального процента содержаний редкометальных минералов в шламах используется формула:

$$Q = c p \beta,$$

где Q – содержание минерала в шламе (%);

c – величина отношений содержаний элемента в шламе к его концентрации в пробе;

p – количество шлама в пробе (%);

β – доля содержания элемента в пробе за счет данного редкометального минерала.

В этой формуле значения всех величин являются среднеарифметическими, т.е. полученными по данным нескольких проб. В расчетах использовались данные, полученные при составлении балансов распределения редких элементов по минералам, слагающим различные типы редкометального сырья. Установлено, что от общего количества элементов, содержащихся в пробах, в колумбит-танталите концентрируется 72% тантала и 76% ниобия, в микролите – 90% тантала, в касситерите – 82% олова и в сподумене – 83% лития. Расчетами показано, что от общего количества редкометальных минералов в пробах шламы содержат: касситерита – 3,4%, колумбит-танталита – 3,6%, микролита – 5,3%, сподумена – 6,2%, т.е. при отмучивании проб количество переходящих в шламы минералов зависит в основном от их удельного веса. В то же время среднее содержание редкометальных минералов в шламах изученных пегматитовых проб составляет 4,6%, от общего их количества в породе, что весьма близко к количеству аксессуарных минералов шламах гранитоидных проб 4,4%, полученному экспериментально В.В. Ляховичем (10).

Учитывая процентное содержание того или иного минерала в шламе, были рассчитаны поправочные коэффициенты общих потерь отдельно для каждого аксессуарного минерала при технологической обработке проб редкометальных пегматитов (табл. 3). Расчет проводился по формуле

$$N = 100K/100 - Q,$$

где N – общий поправочный коэффициент потерь минерала при технологической обработке пробы;

K – поправочный коэффициент, учитывающий потери минерала в хвосте пробы;

Q – содержание минерала в шламе (%).

Таблица 2

Зависимость общего поправочного коэффициента потерь аксессуарных минералов от их удельного веса при технологической обработке проб редкометальных пегматитов

Минералы	Удельный вес, г/см ³	Общий поправочный коэффициент потерь (N)	N + λ0,05 ^{х)}
Касситерит	6,7	1,05	1,12
Колумбит-танталит	6,2	1,06	1,15
Микролит	5,1	1,08	1,18
Циркон + циртолит	4,4	1,22	1,37
Гранат	3,8	1,30	1,41
Литиофиллит-сиклерит	3,3	1,90	2,36
Апатит	3,21	1,74	1,94
Сподумен	3,16	1,64; 3,82	1,96; 4,26
Турмалин	3,11	1,90	2,11
Амблигонит-монтебразит	2,98	2,57	2,69
Средний		1,55	1,73

^{х)}Общий поправочный коэффициент потерь, рассчитанный по максимальному значению доверительного интервала, с доверительной вероятностью 0,95.

Приведенные данные подтверждают отмечавшуюся ранее многими исследователями зависимость коэффициентов потерь аксессуарных минералов от их плотности: с ее уменьшением возрастают их коэффициенты потерь (см. табл. 2). Особое положение при этом занимает сподумен, для которого наблюдается прямая зависимость коэффициента потерь от содержания минерала в пробе. При небольших содержаниях сподумена (до 300 г/т) коэффициент потерь его равен 1,64, т.е. соизмерим с аналогичными коэффициентами других аксессуарных минералов, характеризующихся близкими удельными весами. Но когда количество сподумена достигает уровня породообразующего минерала, коэффициент его потерь резко возрастает (до 3,8).

График (рис. 1) зависимости средних значений коэффициентов потерь (N̄) аксессуарных минералов от их плотности (d) построен по данным табл. 2. Преобладающее количество фигуративных точек совпадает с

кривой или имеет весьма незначительный разброс, кроме фигуративной точки сподумена (1) при высоких его содержаниях в пробах. На графике также приведена кривая зависимости между максимальными значениями доверительно интервала средних коэффициентов потерь ($\bar{N} + \lambda 0,05$) отдельных минералов и их удельного веса (d), которая характеризуется несколько более значительной амплитудой отклонений фигуративных точек по сравнению с первой кривой. Кривые очень близки по своей форме и весьма наглядно подтверждают закономерное увеличение коэффициентов потерь аксессуарных минералов с уменьшением их плотности [11].

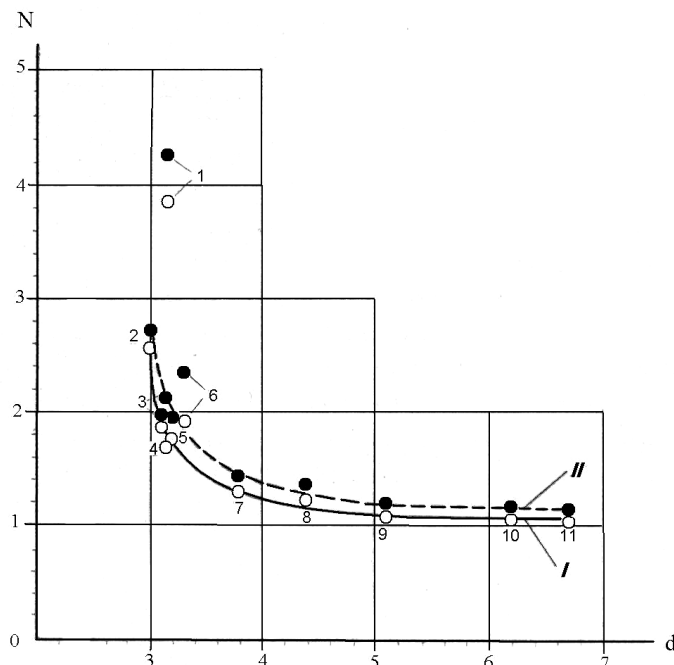


Рис. 1. Зависимость поправочных коэффициентов потерь (N) редкометалльных и других аксессуарных минералов от их плотности (d). I – средние арифметические значения поправочных коэффициентов потерь (N), II – максимальные значения их доверительного интервала ($N + \lambda 0,05$):

1 – сподумен (при содержаниях в породе больше 300 г/т); 2 – амблигонит-монтебразит; 3 – турмалин; 4 – сподумен (при содержаниях в породе меньше 300 г/т); 5 – апатит; 6 – литиофиллит-сиклерит; 7 – гранат; 8 – циркон+циртолит; 9 – микролит; 10 – колумбит-танталит; 11 – касситерит.

Очевидно, что данные табл.2 и рис. 1 могут быть использованы для определения коэффициентов потерь других аксессуарных минералов по величине их плотности при обработке проб различного пегматитового сырья. Приведенная методика и результаты выполненного исследования могут быть использованы также при проведении опытно-методических работ по комплексной оценке перспективности россыпей ближнего сноса на всех стадиях ГРР.

Особо важное значение имеет учет «технологических» потерь редкометалльных и прочих аксессуарных минералов при составлении поминеральных балансов распределения редких металлов в различных типах редкометалльных руд при подсчете их запасов в промышленных месторождениях. Очевидно, что без учета индивидуальных потерь каждого редкометалльного минерала, расхождение результатов подсчета запасов, проведенных обычным способом (по данным химических анализов) и «по минералу» может быть наибольшим для лития (в 2-4 раза) и наименьшим – для тантала и олова (см. рис. 1).

Разработанный автором комплекс методов локального прогнозирования, поисков и перспективной оценки редкометалльных пегматитовых полей был апробирован на эталонных месторождениях, их флангах, глубоких горизонтах и на новых площадях. В результате, в процессе выполнения договорных работ с геологоразведочными организациями и ГОКаи в Узбекистане, Киргизии, В. Казахстане, В. Забайкалье и Приморье, им были переданы практические рекомендации, позволившие внести существенные коррективы в направления и методику работ. Разработка Атласа «Структурно-геоморфологический метод прогнозирования редкометалльных месторождений» была отмечена Дипломом 2-й степени на ВДНХ, а ее авторы (Д.Я. Айздердзис, Г.Б. Мелентьев, Л.И. Веремеева и др.) – награждены серебряными и бронзовыми медалями. Совмещенное использование аналитико-графического, морфоструктурного и шлихо-геохимического методов оказалось наиболее эффективным и обусловило возможности выдачи опережающих рекомендаций на обнаружение и комплексную оценку новых типов редкометалльного сырья, включая обнаружение поллуцитсодержащих жил, новых, не выходящих на дневную поверхность жильных серий редкометалльных пегматитов в пределах

опущенных неотектонических блоков (Узбекистан и др.) и нетрадиционного для Калбинской пегматитовой провинции (В. Казахстан) месторождения оловорудно-редкометалльных гранитов (Карасу) на юго-восточном фланге этой провинции, наличие которых было подтверждено бурением (6). Рекомендации на поиски месторождений редкометалльных гранитов как нового типа сырья для Белогорского ГОКа в этой провинции впервые были разработаны для ее наименее эродированного обрамления на ЮВ и СЗ флангах, а также для российской территории в высокогорной части Алтая.

Эффективность авторской методики минералого-геохимического опробования и картирования редкометалльных пегматитовых полей и месторождений, сопровождающегося изучением их обогатимости с выделением и анализом мономинеральных фракций породообразующих и акцессорных минералов, была подтверждена не только использованием ее в прогнозно-поисковых целях, но и при подсчетах извлекаемых запасов и переоценке сырья эксплуатируемых месторождений на весь комплекс содержащихся в них полезных и лимитируемых с технологических и экологических позиций компонентов с составлением поминеральных балансов их распределения. В частности, была установлена обогащенность так называемых «альбит-сподуменовых» пегматитов в верхних горизонтах жильных серий мелкокрапленным микроклином до 15-20%, что позволило утвердить их в качестве микроклин-сподумен-альбитового типа, обогащенного танталом и цезием (с рубидием), переоценить «керамические» пегматиты Лалабулакского пегматитового поля в Узбекистане в качестве крупного промышленного месторождения редкометалльно-керамического сырья, выявить существенные различия в потенциальной промышленной ценности месторождений лепидолит-альбитовых пегматитов, остающихся неизученными на глубину в Приморье, Узбекистане и на Памире и т.д.

В настоящее время применение авторских методов перспективной оценки новых площадей и объектов на нескрытые эрозией или погребенные месторождения редкометалльных пегматитов и гранитов, в том числе – путем разбровки кварцево-жильно-штокверковых проявлений по составу касситерита, может быть рекомендовано в первую очередь для выделенных поисковых площадей в районах возобновляемой деятельности Белогорского ГОКа в Казахстане, легкодоступных объектов поисков и оценки редкометалльного сырья в Узбекистане, Таджикистане (Гиссар, Памир), на Украине (Сорокинская зона и др.) и, возможно, в Киргизии, т.е. в южных государствах СНГ. В России наиболее перспективным представляется проведение подобных работ в Карелии и Кольском регионе, где рекомендуются доизучение и опытно-промышленная эксплуатация проявлений танталсодержащих и разведанных комплексных редкометалльных пегматитов на СЗ фланге Колмозеро-Вороньегундровской жильной зоны, а также фторидно-иттриево-танталовых пегматоидных фаций щелочно-гранитных интрузий в Кейвах и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелентьев Г.Б. Редкие металлы как «витамины» промышленности: состояние и перспективы. В сб.: Прикладная геохимия, вып. 7, кн. 2 (к 100-летию К.А. Власова). М.: ФГУП ИМГРЭ, 2005, с. 251-262.
2. Мелентьев Г.Б., Торицова М.В., Зубков А.А., Линде Т.П., Делицын Л.М. Перспективы организации производства редких металлов в государствах Средней Азии за счет комплексной переработки и использования природного и техногенного сырья инновационными горно-технологическими предприятиями. В сб. Материалы V Конгресса обогатителей стран СНГ, 23-25 марта 2005 г., г. Москва. Том 3, с. 110-120. М.: изд. МИСИС-Альтекс, 2005.
3. Мелентьев Г.Б. Творческое наследие К.А. Власова в редкометалльном пегматитообразовании и его прикладные следствия. В сб.: Прикладная геохимия, вып. 7, кн. 2 (к 100-летию К.А. Власова). М.: ФГУП ИМГРЭ, 2005, с. 307-324.
4. Сб. Принципы и методы крупномасштабного прогнозирования редкометалльных месторождений. Ред. В.В. Булдаков, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1978. – С. 178.
5. Мелентьев Г.Б., Степанов А.Е., Марьянова Н.П., Маслов В.А. Оловорудно-редкометалльные месторождения гранитовой формации на флангах пегматитовой провинции, условия их формирования и перспективы поисков. В сб. Крупномасштабное прогнозирование эндогенных редкометалльных месторождений и их оценка. Ред. В.В. Иванов, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1983, с. 5-30.
6. Мелентьев Г.Б. Новая петрологическая модель формирования редкометалльных месторождений гранитовой формации и ее роль в разработке объемно-количественной методики их прогнозирования, поисков и перспективной оценки. В сб. Локальное прогнозирование и перспективная оценка эндогенных сырьевых источников редких металлов. Ред. В.В. Иванов, Г.Б. Мелентьев. М.: ИМГРЭ, 1987, с. 7-44.
7. Мелентьев Г.Б., Делицын Л.М., Мелентьев Б.Н. Ликвация расплавов и ее значение в петрологии. В кн.: Редкометалльные граниты и проблемы магматической дифференциации. Ред. В.С. Коптев-Дворников. М.: Недра, 1972, с. 253-285.
8. Мелентьев Г.Б., Айздердзис Д.Я., Марьянова Н.П. и др. Пространственно-генетические взаимоотношения и особенности состава редкометалльных, оловорудных и вольфрамовых проявлений гранитного магматизма как основа прогнозирования и поисков новых месторождений в горнорудных провинциях. В сб.: Тез. докл. III Всесоюз. пегматитового совещ., 8-10 июня 1982 г., Иркутск. Изд. ГЕОХИ СО АН СССР, 1982, с. 197-199.
9. Ляхович В.В. Рациональная методика извлечения акцессорных минералов из гранитоидов. М.: Недра, 1956.
10. Ляхович В.В. О потерях, сопровождающих извлечение акцессорных минералов из изверженных горных пород. Труды ИМГРЭ, вып. 18. М.: изд. АН СССР, 1963.
11. Акелин Н.А., Мелентьев Г.Б., Пиккат-Ордынская А.П. и др. Учет потерь редкометалльных и других акцессорных минералов при обогащении пегматитовых руд на концентрационном столе КЦ-30. Экспресс-информация ВИЭМС Миннего СССР «Лабораторные и технологические исследования и методы обогащения минерального сырья», № 5, 1975, с. 1-11.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД

Каменева Е.Е.

Институт геологии Карельского научного центра РАН

Апатитсодержащие руды традиционно используются для производства удобрений (простого и двойного суперфосфатов, аммофоса, нитроаммофоса, нитрофоски, преципитата и др.), а также кормовых и технических фосфатов.

В зависимости от направления использования государственными стандартами и техническими условиями регламентируется содержание P_2O_5 в концентрате, а также лимитируется содержание вредных примесей – магния, алюминия, железа, карбонатов и силикатов. Эти примеси должны быть удалены на стадии обогащения руды.

Эталоном апатитового концентрата являются апатитовых концентраты, получаемые из апатито-нефелиновых руд Хибинских месторождений. По качеству к ним приближаются апатитовые концентраты, полученные из комплексных руд Ковдорского апатит-магнетитового месторождения.

Запасы богатых апатитовых руд на севере России постепенно истощаются, и перспективы расширения минерально-сырьевой базы апатита связаны с вовлечением в промышленное освоение новых видов апатитсодержащего сырья. Это обстоятельство вызывает необходимость детального технолого-минералогического изучения руд перспективных месторождений с целью обоснования возможности получения апатитовых концентратов, соответствующих установленным требованиям и техническим условиям.

Специфическая особенность апатитсодержащих руд связана в первую очередь с тем, что фосфатное вещество концентрируется в единственном минерале – апатите, поэтому в качестве главного признака классификации руд на природные и технологические типы принят минеральный состав руд и содержание пятиокси фосфора (Минерагения и прогноз..., 1991). Именно эта классификация используется в практике геологоразведочных работ при оценке вновь выявленных руд на обогатимость.

На ранних стадиях геологоразведочных работ целью технологических исследований является установление соответствия вещественного состава и технологических свойств нового объекта и руд промышленно освоенных месторождений методом аналогии. При этом выделяются природные типы руд по какому-либо признаку (составу, текстурно-структурным особенностям, минеральному, химическому составу и т.д.), после чего проводится аналогия (стадия поисковой разведки). Анализ показывает, что типы руд выделяются в зависимости от минерального состава и содержания P_2O_5 . Другие характеристики при не учитываются.

Технологические исследования проводятся в ограниченном объеме на материале малообъемных проб для каждого выделенного типа. В подавляющем большинстве случаев технологические исследования апатитсодержащих руд направлены:

- на изучение возможности получения апатитового концентрата требуемого качества;
- уточнение параметров технологии флотационного обогащения и реагентных режимов флотации.

В то же время, анализ многочисленной геологической и технологической литературы, посвященной апатитсодержащим рудам, показывает, что исследования минерального, химического состава и текстурно-структурных руд недостаточно для точной прогнозной оценки обогатимости. Это обусловлено тем, что кроме перечисленных факторов на результаты флотационного обогащения оказывают влияние факторы, связанные с особенностями самого апатита в составе руд. При этом следует учитывать, что химический состав одного и того же минерала изменяется в зависимости от характера и количества изоморфных примесей, а состояние его поверхности – от условий образования и структурных особенностей кристаллов. Это в свою очередь связано с генетическими особенностями того или иного месторождения.

Обобщение результатов технолого-минералогических исследований апатитсодержащих руд показывает, что они различаются по минеральному, химическому составу, текстуре и структуре, физико-химическим и другим свойствам не только в разных месторождениях, но и в пределах одного рудного тела. Известные классификации в той или иной мере учитывают перечисленные признаки, но степень важности их в отношении оценки технологических свойств до сих пор остается недостаточно раскрытой.

Проведенными минералого-технологическими исследованиями апатитсодержащих руд различного генезиса (apatito-нефелиновых руд Хибинских месторождений, комплексных магнетит-apatитсодержащих руд Ковдорского месторождения, апатит-карбонатных руд Тикшеозерского месторождения и комплексных апатит-силикатных руд Элисенваарского массива.) установлено, что основное влияние на их флотационные свойства оказывают три группы факторов: 1) минеральный состав руд, 2) текстурно-структурные особенности руд, 3) состав и свойства рудообразующего апатита. Совокупность этих факторов определяют конечные показатели флотации – качество концентрата и извлечение пятиокси фосфора.

Состав и структурные особенности апатита. Апатит $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$ – природный фосфат кальция. В зависимости от соотношения анионов различают фтор-, фторгидроксил-, окси-, хлор- и фторкарбоната-

патит. Чистые фтор-, хлор- и гидроксилapatитов встречаются редко, наиболее распространены фторгидроксил-, фторкарбонат- и фторхлорapatиты. В катионной группе апатита проявляется изовалентный изоморфизм $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Sr}^{2+}$ и $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$. Гетеровалентный изоморфизм наблюдается при вхождении в катионную группу лантаноидов, редких земель, урана, тория и трехвалентного железа.

Особенности изоморфизма апатита необходимо учитывать при оценке его флотационных свойств. В частности, с изоморфизмом связана дефектность структуры апатита, размеры кристаллической решетки, заряд поверхности – то есть те свойства, которые определяют его сорбционную активность и флотируемость. Существует взаимосвязь изоморфизма в катионной группе и флотируемости апатита исследователями (Бобрышев, 1982, Каменева, 1983).

Не менее важное значение для флотации апатита имеет характер расположения сорбиционноактивных ионов кальция в кристаллической решетке. Ионы кальция в структуре апатита имеют различное положение. Часть ионов Ca^{2+} (I) семерной координации располагается по стенкам гексагональных каналов, в центре каналов – ионы F^- , Cl^- , OH^- , каждый из которых связан с тремя ионами Ca^{2+} (I); другие ионы Ca^{2+} (II) образуют колонки между тетраэдрами PO_4^{3-} и имеют девятимерную координацию.

При флотации на поверхности скола апатита вскрываются катионы кальция, причем катиона Ca_I^{2+} располагаются на поверхности скола и входят в координационные комплексы CaO_6 ; катионы Ca_{II}^{2+} – в углублениях между анионами (координационные комплексы CaO_9F). Таким образом, в адсорбционном процессе участвуют преимущественно катионы Ca_I^{2+} , совокупность которых определяет адсорбционную активность анионного собирателя. Этим фактом можно объяснить отсутствие однозначной зависимости между содержанием кальция в апатите и его флотируемостью.

В то же время изучение флотационных свойств хибинского апатита позволило выявить зависимость сорбционной активности апатита по отношению к оксигидрильным собирателям, изоморфизмом $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{TR}^{3+}$ и дефектностью кристаллической решетки типа $\text{F}^-\text{O}-\text{F}^-$ (Каменева, 1983).

При исследовании апатита из разных месторождений методом ЭПР спектры радикала $\text{F}^-\text{O}-\text{F}^-$ зафиксированы во всех исследованных образцах. Этот дефект структуры отождествляется с парамагнитным центром аксиальной симметрии, находящимся в положении иона кислорода и взаимодействующим с двумя соседними ионами фтора и интерпретируется как ион кислорода, захвативший «дырку», в положении иона фтора. Интенсивности спектра, определенные по амплитуде резонансной линии, для исследованных образцов апатита, различны, что свидетельствует об изменчивости концентрации указанного дефекта. Для исследованных образцов прослеживается соответствие дефектности структуры и суммарным содержанием редких земель. Это вывод нами интерпретируется следующим образом. При замещении позиций фтора ионом кислорода по типу $\text{F}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$, приводящему к образованию ионного радикала $\text{F}^-\text{O}-\text{F}^-$, сохранение электронейтральности структуры достигается за счет изоморфного замещения двухвалентного кальция трехвалентными ионами TR^{3+} : $\text{Ca}^{2+}\text{F}^- \rightarrow \text{TR}^{3+}\text{O}_F^{2-}$. Поскольку с ионами фтора и, следовательно, с замещающими их ионами кислорода в случае образования радикала $\text{F}^-\text{O}-\text{F}^-$, координационно связаны катионы Ca_I^{2+} , можно априорно утверждать, что изоморфные катионы $\text{TR}_{\text{Ca}}^{3+}$ располагаются на поверхности скола.

Таким образом, увеличение концентрации дефектов $\text{F}^-\text{O}-\text{F}^-$ приводит к увеличению относительной доли TR^{3+} и Ca^{2+} на поверхности. Следствием этого процесса является возрастание концентрации центров с избыточным положительным зарядом, что означает увеличение сорбционной активности в отношении иона собирателя. (рис. 1).

На флотацию сильное влияние оказывают «неизбежные» ионы. Присутствие этих ионов связывается с водорастворимыми минеральными примесями. Есть данные, объясняющие «неизбежные» ионы вскрытием жидких и газовой-жидких включений в минералах (Скамницкая, Каменева, 2005). По данным других исследователей, жидкие включения в апатите состоят в основном из концентрированного водного раствора, содержащего ионы Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- . В газовой фазе разными исследователями установлены H_2 , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 , He (Дудкин, 1977).

В зависимости от присутствия этих ионов происходит либо активация, либо депрессия минералов, находящихся во флотационной пульпе. В частности, установлено, что присутствие в пульпе ионов SO_4^{2-} , Cl^- активизирует флотацию апатита, увеличение содержания Ca^{2+} резко снижает его извлечение (Голованов, 1976).

Минеральный состав руд. Согласно признанной в настоящее время геолого-технологической классификации апатитосодержащих руд выделяют пять типов: силикатно-окисный, силикатный, карбонатно-силикатный, карбонатный и гидросиликатно-гидроокисный (Минерагения и прогноз..., 1991).

Руды силикатного типа (апатито-нефелиновые руды Хибин, апатит-силикатные руды Элисенваарского массива) характеризуются значительным различием флотационных свойств рудных и породообразующих минералов, что является благоприятным фактором для технологического процесса обогащения. Для руд карбонатного типа (комплексные руды Ковдорского месторождения, апатитовые карбонатиты Тикшеозерского месторождения) в большинстве случаев характерна резко выраженная переменчивость соотношения содержания минеральных компонентов, разнообразие текстурно-структурных разновидностей и, соответственно, худшие технологические свойства (табл. 1, рис. 2).

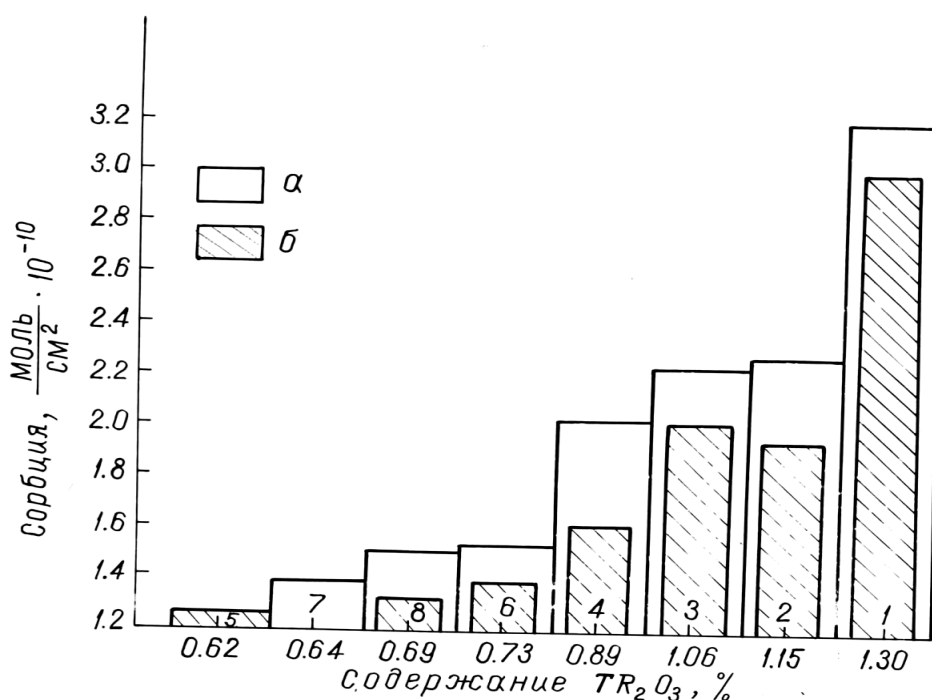


Рис. 1. Зависимость сорбции олеата натрия на поверхности апатита от содержания редких земель:

а – при равновесной концентрации, в – после отмывки; 1-8 – разновидности апатита

Таблица 1

Минеральный состав апатитосодержащих руд

Место-рождение	Тип	Подтип	Минеральный состав	Содержание P_2O_5 , %
1	2	3	4	5
Хибинская группа	Силикатный	Апатито-нефелиновый	Апатит (7-68), нефелин 19-65), сфен (3-18), эгирин (7-17), полевошпат (1-3), титаномагнетит (1-6).	12,0
Элисенваара		Апатит-силикатный (ладогалиты, невоиты)	Апатит (3-15%), сфен (1-4%), циркон (0,01-0,15%), амфибол (0-35%), роговая обманка (0-45%), пироксен (0-15%), карбонат (0-0,55%)	3,62
Ковдорское	Карбонатный	Апатит-карбонатный	Магнетит (18-60), апатит (5-31), форстерит (12-48), карбонаты (2-28), флогопит (2-6).	6,4
Тикшеозерское		Апатитоносные карбонаты	Апатит (1-17%), кальцит (50-90%), доломит (7-25%), биотит (1-9%), магнетит (1-4%), силикатные минералы (0,5-7%)	4,51

Примечание. В графе 4 приведены пределы содержаний минералов по текстурным разновидностям руд.

При технологической оценке руд основным критерием является содержание апатита (пятиокси фосфора). В то же время эта величина позволяет с достаточной степенью условности судить только о количестве апатитового концентрата, которое можно получить из руд данного типа (рис. 3); для предварительного выбора технологии обогащения необходим анализ данных по минеральному составу руд.

Сопутствующие минералы в составе апатитосодержащих руд оказывают влияние на выбор схемы обогащения и реагентного режима флотации.

Наибольшую технологическую трудность представляет собой флотационное разделение минералов, содержащих в кристаллической решетке ионы щелочноземельных металлов, проявляющих близкие свойства по отношению к анионоактивному собирателю – кальцита и доломита (карбонатные тип руды). При невысоком содержании карбонатных минералов (руды Ковдорского месторождения, содержание карбонатов в питании апатитовой флотации не превышает 30%) проблема получения высококачественного апатитового концентрата решается путем увеличения числа перемешиваний.

При значительном исходном содержании карбонатов (apatитовые карбонатиты Тикшеозерского месторождения – до 50-90% карбонатов) для эффективной флотации апатита необходимо применения сильнодействующего собирателя и селективного депрессора. Отделение апатита от карбонатов осложняется еще и тем, что последние легко переизмельчаются. Таким образом, снижение крупности исходного материала также нарушает селективность разделения апатита и кальцита, и эффективность разделения апатита и кальцита может быть повышена на основе применения нетрадиционных технических решений.

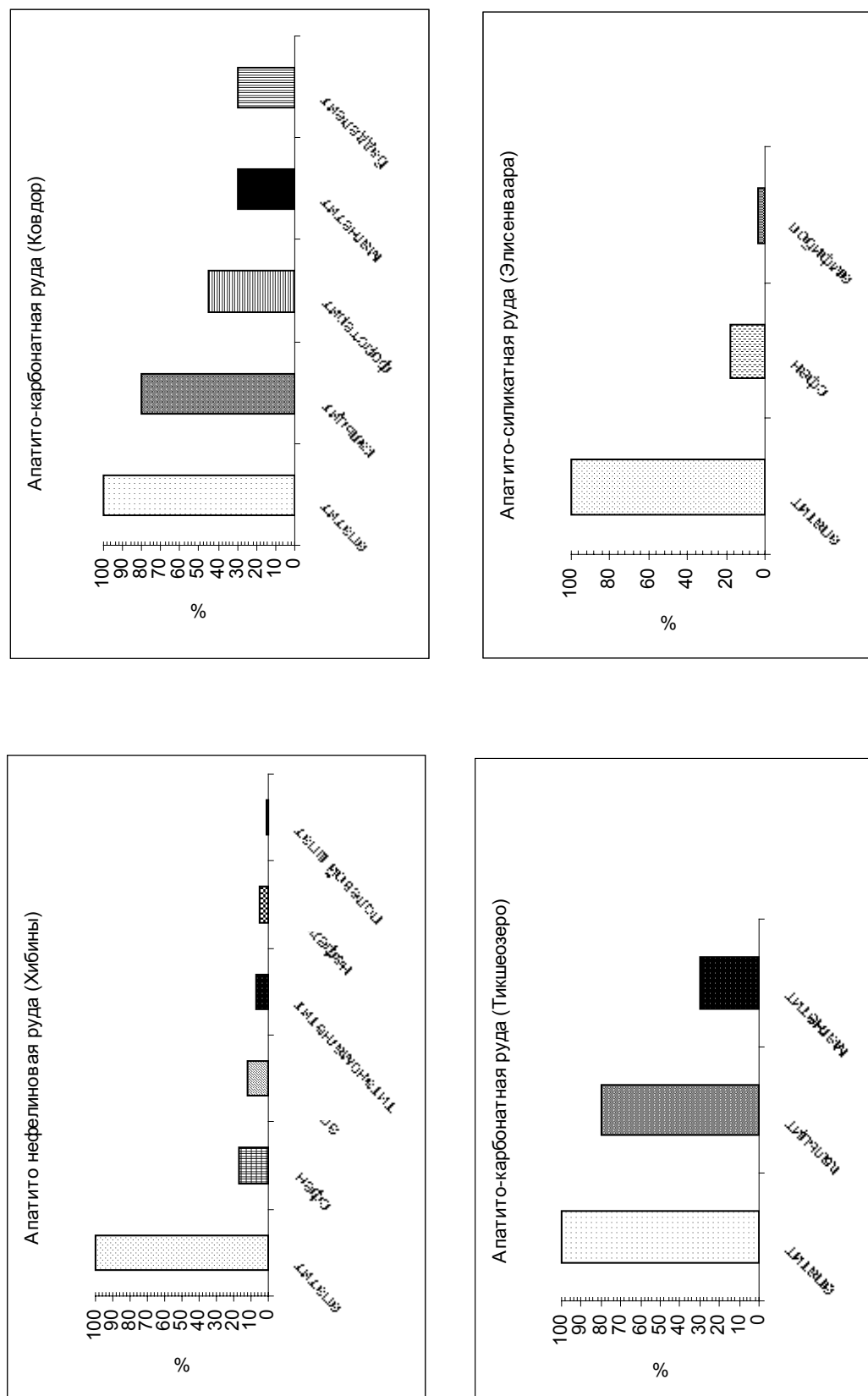


Рис. 2. Контрастность типов руд по флототируемости минералов жирнокислотным собирателем

Руда Тикшеозерского месторождения содержит магнетит (до 4 вес%), поэтому перед флотацией апатита необходимо проводить магнитную сепарацию независимо от их исходного содержания. Магнетит проявляет слабые флотационные свойства по отношению к карбоксильному собирателю, и при флотации будут частично переходить в апатитовый концентрат.

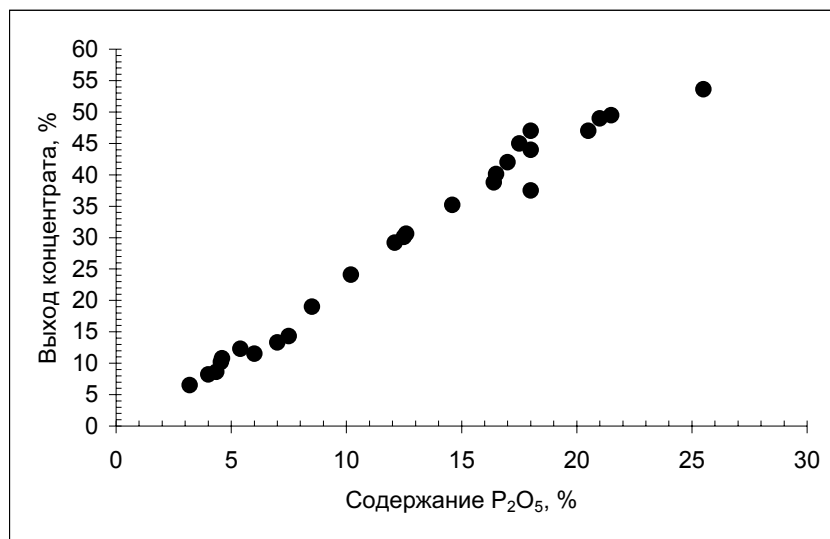


Рис. 3. Зависимость выхода апатитового концентрата от содержания P_2O_5 в руде

Текстурно-структурные особенности

При изучении текстурно-структурных особенностей апатитовых руд с точки зрения флотации важны следующие факторы – формы выделения апатита, степень раскрытия сростков апатита и сопутствующих минералов, наличие микровключений в зернах апатита и гранулометрический состав.

Формы выделения апатита в различных типах руд весьма разнообразны: от отдельных кристаллов призматического и игольчатого облика до поликристаллических округлозернистых, зернистых (сахаровидных) кристаллов. Размеры кристаллов меняются в широких пределах – от 0,005мм до 5-7мм. Наиболее высокую флотационную активность проявляют сахаровидные зерна апатита (Бобрышев, 198).

С точки зрения флотации наиболее благоприятными являются неоднородные текстуры, когда контрастность руды проявляется уже на стадии мелкого дробления, а при измельчении сростки раскрыты практически полностью. Изучение контрастности апатитовых руд, оцениваемой по показателю фазового раскрытия Φ , указывает на прямую связь этого показателя с содержанием апатита в руде: чем богаче руда, тем выше ее контрастность (рис. 4). Для более бедной руды, характеризующейся тонкой вкрапленностью апатита, требуется более тонкое измельчение.

В то же время, эксперименты показывают, что эффективно флотируется руда крупностью $-0,2+0,1$ мм. Более крупные и более мелкие фракции флотируются с низким извлечением (рис. 5). Пределы измельчения устанавливаются в зависимости от вкрапленности минералов, но ограничиваются крупностью 0,071мм. Теоретически возможно подобрать режим измельчения, при котором содержание крупных классов и шламов будет минимально, но при этом необходимо учитывать гранулометрическую границу раскрытия сростков, индивидуальную для каждого данного типа руды.

Поскольку содержание фракции $-0,071$ мм при флотации должно быть ограничено, апатиты с микровключениями вообще не могут быть раскрыты полностью.

Одновременно оценено влияние на технологические показатели флотации апатита присутствие тонких шламов. Показано, что проведение флотационного обогащения апатита на небесшламленном питании приводит к снижению технологических показателей. В этом случае кондиционный апатитовый концентрат (36 и более% P_2O_5) может быть получен только при введении дополнительных перечистных операций.

Выводы

В результате технолого-минералогического изучения апатитсодержащих руд различного генезиса обосновано, что основное влияние на флотационные свойства апатитсодержащих руд оказывают три группы факторов: 1) минеральный состав (парагенезис минералов, определяющий принадлежность руды к тому или иному технологическому типу и соотношение содержания основных рудообразующих минералов), 2) текстурно-структурные особенности (формы выделения апатита, степень раскрытия сростков апатита и сопутствующих минералов, наличие микровключений в зернах апатита и гранулометрический состав), 3) состав и

свойства рудообразующего апатита (изоморфные примеси в катионной группе, дефектность кристаллической структуры, оцениваемая по количеству парамагнитных центров F-O-F⁻). Совокупность этих факторов определяет конечные показатели флотации – качество концентрата и извлечение пятиоксида фосфора.

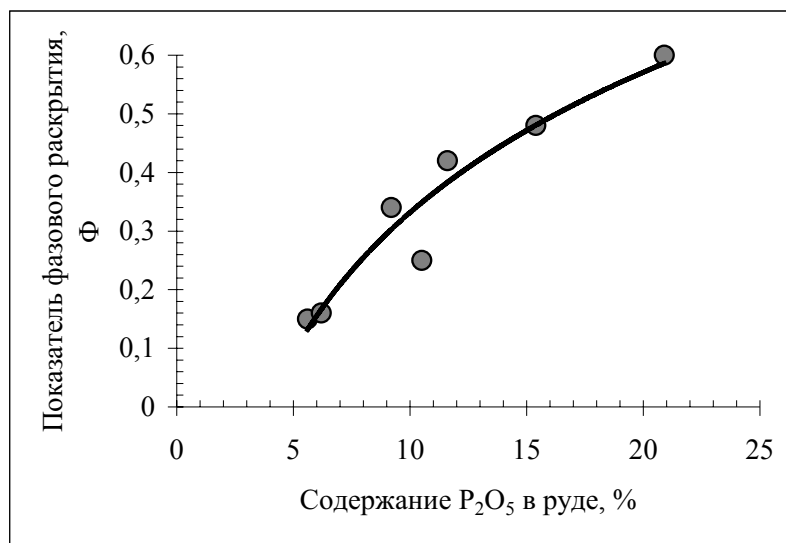


Рис. 4. Показатель фазового раскрытия в зависимости от крупности

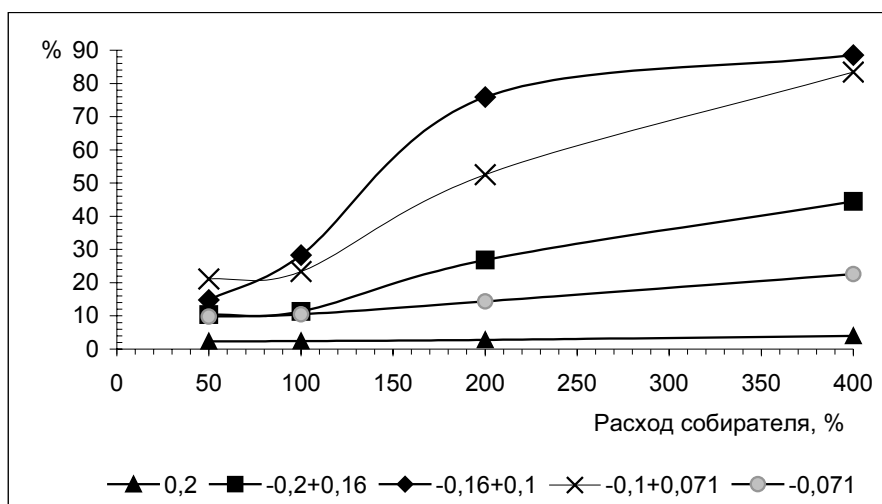


Рис. 5. Флотуемость апатитовой руды в зависимости от крупности

Неоднородность состава и технологических свойств апатитсодержащих руд вызывает необходимость учета всей совокупности факторов при геолого-технологическом картировании, прогнозной оценке обогащения и решении практических задач, связанных с их обогащением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – Север (грант 05-05-97524).

ЛИТЕРАТУРА

- Белов Н.В. Об изоморфных замещениях в группе апатита. – Докл.АН, 22, №2, 1939.
 Бобрышев Г.И. Геолого-технологические основы эффективной эксплуатации апатит-нефелновых руд месторождений Хибин. – Автореферат дисс. ... канд.геол.-минер. Наук. – Л., 1982. – 23с.
 Голованов Г.А. Флотация Кольских апатитсодержащих руд. М, Химия, 1976. – 216с.
 Дудкин О.Б., Геохимия и закономерности концентрации фосфора в щелочных массивах Кольского полуострова. Л., Наука, 1977.
 Каменева Е.Е. Флотационная минералогия апатита / Основы минералургии. Теория и практика разделения минералов, – М., наука, 1983. – С.245-249.
 Минералогия и прогноз месторождений апатита. – сост. Р.М.Файзуллин. – М.: Недра, 1991. – 256с.
 Скамницкая Л.С., Каменева Е.Е. Изучение газовой-жидких включений в минералах с позиций технологической минералогии / Обогащение руд. – №2, 2005. – С.31-36.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ СЛЮД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Лузин В.П.

ФГУП «ЦНИИгеолнеруд», г. Казань; root@geolnerud.mi

Назначение технологической минералогии

Комплексное изучение с применением методов технологической минералогии мелкоразмерных слюд (мусковита, парагонита, флогопита, биотита, гидромусковита, гидрофлогопита, гидробиотита, глауконита и др.) позволяет надежно выделять их природные и промышленные типы, прогнозировать и устанавливать технологические и эксплуатационные свойства, выявлять области применения, определять возможности комплексного освоения рекомендуемых объектов, повысить представительность лабораторных проб и, в конечном счете, получить достоверные сведения о запасах (ресурсах). Довольно часто результаты технологической минералогии являются определяющими при установлении генезиса основного полезного ископаемого.

Мелкоразмерные слюды природных объектов

Основные природные месторождения приурочены к следующим геологическим формациям [1,2,3,4]:

- гранитных пегматитов (мусковит, биотит);
- грейзенов (мусковит);
- слюдяных сланцев (мусковит, парагонит, флогопит, биотит);
- гнейсов (биотит);
- гранитов (мусковит);
- комплексов ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов (флогопит);
- коры выветривания гранитов, пегматоидных гранитов, гнейсогранитов, грейзенов, слюдяных сланцев и т. д. (мусковит);
- озерные илы (мусковит), огнеупорные глины (мусковит);
- пески (глаукониты).

Подразделение собственных месторождений мелкоразмерной слюды по величине запасов пока не разработано в Российской Федерации.

В настоящее время в Российской Федерации выявлен только один перспективный природный объект, где основным полезным ископаемым является мелкоразмерная слюда. Это Саздинское проявление мусковита –15±0.0 мм, приуроченное к корам выветривания по гранитоидам, гнейсам и сланцам на Южном Урале в Оренбургской области. Вторым значимым объектом мелкоразмерных слюд (мусковита и парагонита) может быть Кубань-Кольчубинское проявление на Северном Кавказе. По другим известным объектам, расположенным в Иркутской и Мурманской областях и в Республике Карелия, имеются лишь запасы мелкоразмерного мусковита фракции –20±5 мм, которые являются объектом попутной добычи на месторождениях листового (крупнокристаллического) мусковита с площадным размером кристаллов больше 4 см². Сведениями о гранулярном составе попутного мелкоразмерного мусковита таких месторождений как Отвалы № 15 и Липовый Лог в Свердловской области, Спокойнинское в Читинской области, Алахинского в Республике Алтай, к сожалению, отсутствуют. Концентраты мелкоразмерных слюд – мусковита и флогопита получают путем дробления и помола рудничных и фабричных слюдяных скрапов, а также при дообогащении слюдосодержащих руд редких и цветных металлов способом флотации. Однако в настоящее время рост потребности в мелкоразмерной слюде превосходит возможности их попутного извлечения при добыче крупнокристаллической слюды на месторождениях мусковита и флогопита, а также из руд редких и цветных металлов. Это приводит к необходимости разведки и промышленного освоения новых месторождений, для которых основное полезное ископаемое было бы представлено только мелкоразмерной слюдой.

По результатам комплексной сравнительной оценки физических, химических и технических свойств крупнокристаллических и мелкокристаллических образцов мусковита, флогопита и биотита было установлено, что природные мелкоразмерные слюды по своим минералогическим, техническим и технологическим характеристикам не уступают крупноразмерным слюдам одноименных разновидностей, а по некоторым параметрам даже превосходят их.

Например, в структурах крупнокристаллического и мелкокристаллического мусковитов из зоны пегматитов по данным ЯГР (мессбауэровской спектроскопии) различий в соотношении ионов Fe²⁺ и Fe³⁺ не обнаружено. Для листового и мелкокристаллического флогопитов ЯГР-спектр представлен в структурах практически идентичными ионами Fe²⁺ и Fe³⁺.

По результатам электронного микроскопического анализа не обнаружено различий для крупнокристаллических и мелкокристаллических мусковитов пегматитового происхождения в морфологическом облике кри-

сталлов и во внутреннем строении. Для разновидностей флогопита устанавливается высокая степень кристаллической структуры, но в крупнокристаллическом флогопите отмечается повышенное содержание гидрооксидов железа. Для мелкозернистых мусковитов из коры выветривания плагиогранитов характерны две основные природные разновидности. Одна из них с более крупными кристаллами представлена мусковитом с сильно измененной (на 30 %) поверхностью плоскости (001). В другой природной разновидности с меньшим размером кристаллов преобладает каолинит. Морфологический облик и размеры микрокристаллов крупно- и мелкозернистого биотитов практически одинаковы, но в крупнокристаллическом биотите отмечается много дисперсного материала. Отмеченные две минеральные разновидности выделяются при обогащении.

Мелкокристаллические слюды по результатам капнометрического анализа отличаются от крупнокристаллических слюд одноименных разновидностей пониженной величиной магнитной восприимчивости (примерно в 1.2-1.7 раза).

Различия в реальном строении минералов как структурного типоморфного признака для крупнокристаллических и мелкокристаллических слюд по данным электронографического анализа не обнаружено.

При нагревании как крупнокристаллические, так и мелкокристаллические слюды меняют свою природную окраску на новую (искусственную), отличительную для каждой минералогической разновидности [5].

Содержание естественных радионуклидов и их удельная активность для крупнокристаллических и мелкокристаллических слюд одного и того же месторождения обычно находится на одном уровне и не превышает нормы строительных материалов, используемых в жилищном строительстве (≤ 370 Бк/кг).

Полученные комплексные сведения о качестве слюд дают основание расширить число их природных разновидностей, которые можно применять в тех или иных направлениях. Например, нетрадиционные и новые виды природных слюд – мелкозернистый мусковит и смешанные каолинит-мусковитовые и мусковит-каолинитовые минералы из коры выветривания плагиогранитов, гнейсов и сланцев можно использовать наряду с традиционными техногенными (дробленными и молотыми) мелкозернистыми слюдами, получаемыми при переработке листового флогопита и листового мусковита. Биотит можно применять в производстве строительных материалов, декоративной керамики и кислотоустойчивых изделий и т.д.

Мелкозернистые слюды техногенных объектов

Техногенные промышленные месторождения мелкозернистых слюд обычно формируются при горнодобывающих предприятиях. Оценка с целью возможной их эксплуатации дополнительно требует тщательного геологического, технологического и экономического изучения. Основными источниками мелкозернистых слюд на предприятиях, добывающих крупнокристаллическую слюду, являются три вида (типа) отвалов, различающихся по способу образования и в зависимости от этого по их минерало-технической характеристике.

Первый вид формируется при ведении горных работ. В отвалы складывается руда, поступающая непосредственно из забоя. Это может происходить в том случае, когда извлекаемая руда не представляет интереса по содержанию и качеству в ней слюды с площадью пластин больше 4 см^2 , когда простаивает по каким-либо причинам слюдовыборочный комплекс (рудоразборка) или этот комплекс не справляется с переработкой поступающей из забоя руды. В эти отвалы поступает несортированный продукт. Максимальная крупность породных обломков достигает 1.0-1.5 м, а минимальная величина ограничивается сотыми и тысячными долями миллиметра. В соответствии с этим мусковит и биотит здесь представлен пластинами всевозможных размеров.

Второй вид отвалов образуется после рудоразборки слюдовыборочного комплекса. Отвальный продукт представлен тремя классами крупности: крупный – с размерами частиц больше 50 мм, средний – с размерами частиц от 50 до 20 мм и мелкий – с размерами частиц меньше 20 мм. Главная масса слюды сосредоточена в мелком продукте, который складывается в отдельные отвалы.

Третий вид отвалов представлен отходами обогащения фабрики после извлечения мусковита –20+5 мм. В этих отходах по существу должен находиться мусковит мельче 5 мм. Однако содержание такого размера слюды в отвалах не отвечает ее фактическому наличию в недрах, ибо при действующей технологии обогащения основная масса вскрытого мусковита –5.0+0.0 мм теряется на стадии сушки руды (через вытяжную вентиляцию выносятся в атмосферу, загрязняя при этом окружающую среду).

На примере бывшего ГОКа «Карелслюда» основными минералами, составляющими отходы слюдяного производства, являются мусковит 9.63-16.64 %, биотит 2.16-8.21 %, кварц 45.43 % и полевой шпат 31.05-38.71 %. Другие минералы находятся в крайне ограниченном количестве. Все минералы находятся в двух видах: в свободном (раскрытом) виде или в сростках (в связанном состоянии). Для слюды характерна пластинчатая форма и заметное расслоение по спайности. Основное количество балансового продукта, в котором сосредоточен балансовый мусковит –20+5 мм, составляет 28.98-60.2 %. Остальная часть продукта в количестве 39.8-71.02 % содержит мусковит с размером частиц меньше 5 мм.

Для установления пригодности применения техногенного (находящегося в отвалах) мусковита были проведены целенаправленные исследования. При определении качественной характеристики были использованы образцы мусковита из расположенного на поверхности отвала 25-ти летнего возраста (рудник Плотина) и мусковита из действующего забоя шахты «Капитальная» на глубине 156 м этого же рудника (1991 г.).

При определении параметров элементарной ячейки электронографическим способом было установлено, что оба мусковита относятся к диоктаэдрической слюде – мусковиту политипной модификации $2M_1$. При этом мусковит из отвала характеризуется средне-высокой степенью совершенства кристаллической структуры (параметры элементарной ячейки: $a = 5.19 \text{ \AA}$, $b = 8.99 \text{ \AA}$, $c = 20.40 \text{ \AA}$, $\beta = 96.69^\circ$). Мусковит из забоя обладает высокой степенью кристаллической структуры (параметры элементарной ячейки: $a = 5.19 \text{ \AA}$, $b = 8.99 \text{ \AA}$, $c = 20.28 \text{ \AA}$, $\beta = 95.92^\circ$). По величине параметра «с» можно судить об увеличении межпакетных расстояний у мусковита из отвала, а по большому углу « β » о понижении его степени совершенства кристаллической структуры.

При изучении мусковитов с применением электронного микроскопа при увеличении в 11 тыс. раз была установлена неоднородность в строении их агрегатов, наряду с просвечивающимися участками присутствуют не просвечивающиеся. Размеры кристаллов варьируют от 10 и больше микрон. Форма кристаллов у образцов из отвала преимущественно изометричная с волнистыми неровными краями, у образцов из забоя – изометричная, удлинённая, игольчатая. При изучении молотого мусковита (продукта бывшей Петрозаводской слюдяной фабрики) с применением электронного микроскопа при увеличении в 18 тыс. раз на микрокристаллах отмечалось появление таблитчатых микрообразований каолинита, эпитаксиально связанных с плоскостью (001) мусковита. Каолиноподобные новообразования были также выявлены с применением оптической микроскопии в крупных кристаллах мусковита из старых отвалах.

В структуре мусковита по данным ЯГР (мессбауэровской спектроскопии) отмечено наличие двухвалентного и трехвалентного железа (соответственно 64 и 36 % для образцов из отвала и 74 и 26 % для образцов из забоя).

Анализ спектров, полученных при оптико-люминесцентном изучении при комнатной температуре (300° K), показывает на меньшее в 1.5 раза содержание ионов трехвалентного хрома в мусковите из забоя. В области 630 нм спектра мусковита из забоя наблюдается интенсивная полоса, принадлежащая ионам двухвалентного марганца в карбонате. В мусковите из отвала эта полоса практически не проявлена. Интенсивность полосы 570 нм у мусковита из забоя в 5 раз превышает интенсивность полосы в спектре мусковита из отвала. Анализ спектров фотолуминесценции образцов, полученных при температуре жидкого азота (77° K), показывает на различие мусковитов по структуре. Это наглядно проявляется в спектрах ионов трехвалентного хрома. При меньшем содержании в мусковите из забоя ионы трехвалентного хрома образуют обменно-связанные пары, в то время как в мусковите из отвала их концентрация очень мала. Такая ситуация возможна в случае, если параметры решетки кристаллов различаются между собой. Возможно, что имеющиеся различия связаны не с процессами выветривания, а с различным исходным (природным) местонахождением изучаемых образцов.

При нагревании у мусковитов происходят структурные внутренние изменения. Образцы из отвала и из забоя имеют близкие термовесовые характеристики: содержание структурной воды соответственно равно 4.5 и 4.6 %, причем общая потеря массы составляет 5.1 и 5.3 %. Однако процесс гидратации мусковита из отвала начинается на 70° раньше, чем у мусковита из забоя. Это свидетельствует о наличии более прочных связей группы OH^- у мусковита из забоя.

Изучение химического состава мусковитов показало на существенное различие у них только по наличию Fe_2O_3 и FeO . Содержание Fe_2O_3 для мусковита из отвала составляет 4.87 %, что в 1.88 раза больше, чем у мусковита из забоя (2.58 %). Содержание FeO также преобладает у мусковита из отвала и составляет 0.54 % или в 2 раза больше, чем у мусковита из забоя. Содержание других химических элементов у мусковитов исследуемых образцов практически одинаковое, что свидетельствует о высокой сохранности состава мусковита в отвалах независимо от возраста. Спектральным анализом в составе мусковита из отвала установлено 26 элементов, а у мусковита из забоя 22 элемента.

Устойчивость к агрессивным средам образцов мусковита была установлена по растворимости в кислой и щелочной средах. Мусковит из отвала менее устойчив к кислотам (в 1.5 раза) и щелочам (в 1.2 раза), чем мусковит свежедобытый из забоя на глубине 156 м. При этом оба вида слюд склонны к повышенной растворимости в щелочах по сравнению с кислотами.

Отмеченное выше позволяет сделать вывод о том, что качество слюд, пролежавших в отвалах 25 и больше лет, имеет незначительное изменение в сравнении со свежедобытыми слюдами и поэтому они могут применяться в равных условиях.

Основные критерии качества и технологических свойств слюдяных руд

Основными критериями качества и технологических свойств слюдяного сырья являются: содержание слюды в исходной руде и в получаемом концентрате; извлечение слюды в концентрат; величина зерен слюды; способность слюды к механическому обогащению; сохранение форм и размеров кристаллов слюды при обогащении.

На слюдяные руды нет ни ГОСТа, ни единых ведомственных технических условий, так как нормализация этих условий довольно сложна. Поэтому промышленная оценка слюдяных руд для геолога представляет довольно трудную задачу.

Для каждого месторождения разрабатываются собственные технические условия на слюдяные руды, которые определяются целым комплексом показателей, ибо общее процентное содержание слюды в руде еще не решает вопроса об их пригодности. Необходимо, чтобы слюда была способна к механическому обогащению до промышленных концентраций требуемого качества, сохраняя достаточную прочность и размер зерен. Обычно разра-

ботка технологических условий на руды осуществляется совместно с научными и проектными организациями, которые пользуясь данными поисковых и оценочных работ и технологических испытаний представительных проб определяют для этого необходимые кондиции. Получаемые слюдяные концентраты оцениваются на пригодность по соответствующим ГОСТ и ТУ. Кроме штатной оценки качества по ГОСТ и ТУ целесообразно установить свойства слюдяных концентратов для других возможных направлений использования. При этом может появиться необходимость в составлении местных ТУ на товарную продукцию (изделия), которую можно изготавливать на основе изучаемой слюды. Изучение свойств слюды увязывается также с учетом добычи и переработки, обеспечивающей комплексное и безотходное (малоотходное) их применение и извлечение попутных минералов из комплексов и входящих в них элементов, имеющих промышленное применение.

Оценка качества слюдяной руды не может быть полной без определения их химического и минерального составов, изучения характера минеральных ассоциаций, размеров отдельных кристаллов и агрегатов слюд и попутных минералов, текстурно-структурных особенностей, определения основных физических параметров и т.д. С учетом этих показателей, качество руд должно быть оценено по двум требованиям: достаточное изучение технологических свойств и выделение технологических сортов и типов с характеристикой их размещения в объеме месторождения и количественного соотношения.

Технологические испытания сначала проводятся по основным природным, а в дальнейшем, по возможности, и по технологическим типам с учетом перспектив комплексного использования сырья. Современная стратегия поисковых и оценочных работ направлена на более раннюю передачу новых объектов промышленным предприятиям, которые на основе получаемых лицензий проводят разведку и промышленное использование месторождений. Для лицензирования и передачи месторождений в отработку технологические свойства слюдяного сырья должны быть оценены по категории запасов не ниже C_1 .

Определение содержания мелкоразмерных слюд с применением технологических способов обогащения

Для большинства слюдоносных объектов была применена схема определения содержания в породах (рудах) мелкоразмерных слюд по минералу в %, имитирующая технологическую схему обогащения в промышленных условиях. Основными операциями для схемы являются сухое последовательное вскрытие слюдяных агрегатов путем щадящего дробления слюдосодержащей породы (руды) и извлечения их на ситах по узким фракциям крупности до глубины -0.2 мм (обогащение по форме частиц) и последующее флотационное извлечение слюдяных агрегатов фракции $-0.2+0.0$ мм. Вычисление содержания слюды производится отдельно по заданным размерам крупности и целом. В дальнейшем на выделенном слюдяном продукте представляется возможным изучить качество слюд, установить природные и технологические типы (сорта) руд, наметить принципиальную схему обогащения и выявить области комплексного применения мелкоразмерных слюд. Подробно процесс технологического определения содержания в породах (рудах) приводится в методических рекомендациях № 84 «Методика определения содержания в породах мелкоразмерных слюд». Рекомендации разработаны ФГУП «ЦНИИгеолнеруд» и утверждены Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ) при ВИСе МПР (25.10.1995, протокол № 4). Данный способ успешно был применен при оценке (переоценке) ряда известных природных месторождений, техногенных образований и новых объектов мелкоразмерных слюд России, Казахстана, Киргизии, Болгарии, Сербии.

В качестве рядового примера установленное по изложенному принципу количество мелкоразмерных слюд в целом и распределение их по фракциям крупности для некоторых ранее изученных объектов приведены в таблице 1.

По другим объектам содержание в запасах попутного мелкоразмерного мусковита варьирует от 3.2 % до 19.5 %. Например, содержание попутного мелкоразмерного мусковита в разрабатываемом ОАО «Малышевским рудоуправлением» техногенном месторождении Отвалы № 15, сложным некондиционными рудами Квартального бериллиевого месторождения (Свердловская область) составляет 3.2 %, по Спокойнинскому вольфрамовому грейзеновому месторождению (Читинская область) равно 19.5 %, на Алахинском редкометальном месторождении (Республика Алтай) составляет в среднем 8 %.

Для природных месторождений разработка принципиальной схемы обогащения слюд проводится на стадии поисковых и стадии оценочных работ, когда получены первые представления о природных типах руд. По результатам обогащения устанавливаются их технологические типы (сорта). При этом разработка новых и усовершенствование имеющихся способов промышленного извлечения мелкоразмерных слюд представляет собой актуальную задачу, решение которой способствует повышению эффективности горных работ и обогательного производства.

При исследованиях должны выполняться требования к технологии обогащения мелкоразмерных слюд, которые сводятся: к сохранению природных размеров и механических свойств кристаллов слюды, максимальному извлечению слюды из руды и рациональному распределению кристаллов (пластин) слюды различной величины по группам (сортам); полному удалению пустой породы и случайных включений, пылевидных и глинистых частиц; получению однородности товарных групп (сортов) по крупности кристаллов (пластин, чешуек) слюды и степени их раскрытия.

Таблица 1

Содержание и гранулометрический состав слюды в природных и техногенных объектах

Слюда по фракциям крупности, мм	Содержание фракций слюды в % отн. по объектам					
	ГОК «Карелслюда», отвалы рудника Плотина	ГОК «Карелслюда», отвалы рудника Малиновая Варакка	ГОК «Мамслюда», отвалы рудника Витимский	Саздинское проявление мелкозернистого мусковита на Южном Урале	Олимпиадинское месторождение золота, отходы обогащения	ГОК «Ковдор слюда», хвосты слюдыборочного комплекса
-60+20	2.35	0.25	4.49	-	-	-
-20+10	3.99	4.65	17.34	-	-	-
-10+5	8.78	4.58	12.55	Сл.	-	11.00
-5+1.0	18.90	22.16	16.46	1.12	-	28.13
-1.0+0.315	27.06	18.94	12.42	16.35	-	18.85
-0.315+0.16	17.32	17.70	15.07	20.31	-	16.80
-0.16+0.10	9.92	14.15	5.68	12.13	-	8.50
-0.10+0.05	7.34	10.26	7.53	24.61	-	11.87
-0.05+0.00	4.34	7.31	8.46	25.48	100	4.85
	100	100	100	100	100	100
Общее содержание слюды в % абс.	19.57	15.71	19.38	18.1	20.2	27.8
Содержание слюды в балансовых запасах (в недрах)	37.9 кг/м ³ (примерно 1.26 %)	35 кг/м ³ (примерно 1.17 %)	Нет сведений	18.1	Запасы слюды не учтены	Запасы мелкозернистого флогопита не учтены

Разработка принципиальной схемы обогащения на основе технологической минералогии

Для обеспечения выполнения этих требований в процессе исследований определяются следующие параметры исходной руды, концентратов всех видов, отходов всех стадий обогащения и общих хвостов:

- химический состав;
- массовая доля слюды (%): общая и по выделяемым фракциям крупности отдельно на основе ситового анализа;
- гамма-радионуклиды;
- минерало-технические свойства слюды: размер кристаллов (пластин); ломкость; гибкость; расщепляемость; устойчивость к агрессивным средам; истинная и насыпная плотности; влагоотдача при нагревании; термостойкость; укрывистость; выветрелость; потери при прокаливании; величина концентрации водородных ионов водной вытяжки; химический состав; п.п.п.;
- минеральный состав (%): мусковит, биотит, флогопит, гидрофлогопит, гидробиотит, гидромусковит, глауконит, вермикулит, полевошпат, кварц, гранат, каолинит, магнетит, сульфиды, гидроксиды и т.д.;
- физические свойства слюдоносных пород: плотность, влагоотдача при нагревании, выветрелость и др.; минералогические особенности слюд: минеральный вид – мусковитовый, флогопитовый, биотитовый, гидробиотитовый, гидрофлогопитовый, и др.; морфологический тип слюды – массивный, слоистый, гнездовый, вкрапленный и т.д.;
- типы руд в зависимости от слюдоносности: вкрапленные, полосчатые (слоистые), гнездовые, неупорядоченные скопления, пластинчатые или изометричные, жильные и др.; выветрелые или неветрелые и т.д.

Обогащение руд с содержанием слюд фракции –20+1.0(0.2) мм производится способом по форме частиц, а фракции –1.0(–0.2)+0.0 мм методом флотации.

При наличии в рудах нескольких видов слюд, например мусковита и биотита, могут быть получены двуслюдяные (коллективные, смешанные) концентраты. При необходимости они подлежат дообогащению с целью получения монослюдяных концентратов. Чаще всего это достигается с помощью электромагнитного сепаратора для концентратов крупных фракций и флотации для концентратов мелких фракций.

При поисковых и оценочных работах разрабатывается только принципиальная схема обогащения, согласно которой определяются возможные способы переработки слюдяных руд и рекомендуются наиболее перспективные из них. Наиболее полно проблема по разработке принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд изложена в методических рекомендациях № 91 «Методика и требования по комплексной оценке качества и технологических свойств мелкозернистых слюд и вермикулита при региональном геологическом изучении недр и прогнозировании полезных ископаемых, поисковых и оценочных работах». Рекомендации разработаны ФГУП «ЦНИИгеолнеруд» и утверждены Научным советом по методам технологических исследований (НСОМТИ) при ВИСЕ МПР РФ (19.03.1999, протокол № 1). Отдельные варианты по способам флотации мелкозернистого мусковита с учетом технологической минералогии приведены в работах [6,7].

Технологические показатели по комплексной схеме обогащения без обесшламливания биотит-мусковитового, мусковитового и парагонит-мусковитового сырья по ряду природных и техногенных объектов России приведены в таблице 2.

Таблица 2

Технологические показатели обогащения мелкоразмерных слюд

Показатель	ГОК «Карелслюда», отвалы 1 вида рудника Плотина, биотит-мусковитовое сырье, 1989-1993 гг.	ГОК «Карелслюда», отвалы 2 вида рудника Малиновская Варакка, биотит-мусковитовое сырье, 1989-1993 гг.	ГОК «Мамслюда», отвалы 1 вида рудника Витимский, биотит-мусковитовое сырье, Иркутская область, 1991 г.	Саздинское проявление мелкоразмерного мусковита на Южном Урале, Оренбургская область, 2003 г.	Олимпиадинское месторождение золота, мусковитосодержащие отходы, Восточная Сибирь, Красноярский край, 1985 г.	Кубань-Культинское парагонит-мусковитовое проявление на Северном Кавказе, 2005-2006 гг.
Выход концентрата слюды в % масс.						
В том числе:						
по фракции –20(-60)+1.0 мм	14.39	13.54	18.59	17.0	18.70	31.82
по фракции –1.0+0.0 мм	6.67	4.98	11.09	0.17	отсутствует	отсутствует
	7.72	8.56	7.5	16.83	18.70	31.82
Содержание слюды в усредненном концентрате, % масс.	96.92	97.20	98.87	92.00	78.00	94.60
Извлечение слюды, %	71.28	83.77	94.78	86.00	72.23	89.00
Степень обогащения	4.95	6.19	5.1	5.08	3.86	2.8
Степень сокращения	6.95	7.38	5.4	5.88	5.35	3.00
Выход отходов, % масс.	85.61	86.46	81.41	83.00	81.30	68.18
Содержание слюды в отходах, % масс.	6.56	2.95	1.2	2.96	6.90	5.28
Содержание слюды в исходном сырье (руде), % масс.	19.57	15.71	19.38	18.10	20.20	33.70

Испытания по обогащению слюдяного сырья (руд) проводилось на пробах массой от 2.5 до 8.0 кг в лабораторных условиях ФГУП «ЦНИИГеолнеруд».

Перспективность освоения слюдосодержащих неслюдяного производства отходов, образующихся после выделения золота на примере Олимпиадинского месторождения, доказывается тем, что стоимость получаемого попутного товарного продукта – слюдяного концентрата (слюды) приблизительно равна стоимости основного полезного ископаемого – золота, извлекаемого из одного и того же количества перерабатываемой руды. Это повышает рентабельность отработки месторождения золота и обеспечивает предприятию большую эффективность работ. При этом снижаются затраты на производство одной тонны слюды, а следовательно делают ее более конкурентно способной, ибо затраты на проведение горных работ и измельчение руды будут относиться за счет основного полезного ископаемого -- золота.

Разработанная технология сквозного извлечения слюды фракции –20+0.0 мм позволяет прогнозировать увеличение запасов мусковита в старых отвалах слюдяного производства в 3 раза за счет неучтенного мусковита фракции –5.0+0.0 мм по ГОКу «Мамслюда» и в 6 раз по ГОКу «Карелслюда». Одновременно в отвалах следует учесть и имеющиеся запасы биотита. В таком случае стоимость мусковита в отвалах (при минимальной его цене на мировом рынке ориентировочно 200 долл. за одну тонну) увеличивается по ГОКу «Мамслюда» до 74 млн. долл., а по ГОКу «Карелслюда» до 12 млн. долл.

Комплексная оценка мелкоразмерных слюд по стадиям геологоразведочных работ

Изложенное выше показывает, что технологическая минералогия призвана установить широкий спектр вопросов по соответствию качества и технологических свойств мелкоразмерной слюды как природных, так и техногенных объектов требованиям промышленности с применением надежного комплекса методов исследований.

Комплексную оценку технологических свойств мелкоразмерных слюд в связи с их многообразием, изменчивыми природными свойствами и высокими требованиями, предъявляемыми к ним потребителями, целесообразно начинать при региональном геологическом изучении недр. При получении положительных результатов необходимо продолжать изучение полезного ископаемого на основе технологической минералогии с постоянным наращиванием объемов работ и увеличением способов исследования на всех последующих стадиях геологоразведочных работ.

Предлагаются следующие основные направления исследований.

- 1) Опробование (отбор геологических и лабораторных технологических проб);
- 2) Изучение основного полезного ископаемого – слюды с целью установления минеральных видов (разностей), состава и определения свойств, используемых для выбора областей применения, технологии обогащения и контроля за качеством продуктов обогащения;
- 3) Изучение вмещающих слюду пород с целью определения названия, состава и свойств, оказывающих влияние на технологию определения содержания и обогащения слюд;
- 4) Определение содержания мелкозернистых слюд в рудах (породах);
- 5) Разработка принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд;
- 6) Технологические испытания слюдяных концентратов (по направлениям в соответствии с решением заказчика);
- 7) Радиационно-гигиеническая оценка слюдяных концентратов;
- 8) Комплексное заключение о возможности промышленного применения мелкозернистых слюд изучаемых геологических объектов;
- 9) Выделение технологических типов (сортов) руд с установлением общих закономерностей их распределения в недрах исследуемого объекта и их количественного соотношения;
- 10) Комплексное использование недр.

Состав работ по каждому направлению исследований определяется стадией геологоразведочных работ (таблица 3).

Таблица 3

Состав работ по комплексному изучению мелкозернистых слюд

Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
1. Опробование						
1.1.Отбор геологических проб	В зависимости от наличия обнажений и способов вскрытия слюдоносных пород:					
	- штучной	+	+	+	+	+
	- керновый		+	+	+	+
	- бороздовый	+	+	+	+	+
	- валовый			+	+	+
	- задиrkовый			+	+	+
1.2.Отбор лабораторных технологических проб	В зависимости от исходной массы геологической пробы и необходимой (достаточной) массы лабораторной пробы:					
	- без обработки и сокращения геологической пробы	+	+	+	+	+
	- с обработкой и сокращением геологической пробы	+	+	+	+	+
2.Изучение основного полезного ископаемого – слюды с целью установления минеральных видов (разновидностей), состава и определения свойств, используемых для выбора областей применения, разработка технологии обогащения и контроля за качеством обогащения						
2.1.Морфология						
2.1.1.Облик кристаллов (агрегатов)	Визуальное определение для кристаллов (агрегатов) с размером больше 0.1 мм, с применением бинокля или микроскопа для более мелких кристаллов (агрегатов). Для изучения формы реальных кристаллов применяется метод электронной микроскопии	+	+	+	+	+
2.1.2.Размеры кристаллов (агрегатов)	Линейный способ, линейный способ с применением бинокля или поляризационного микроскопа, а при измерении реальных кристаллов с привлечением электронного микроскопа	+	+	+	+	+
2.1.3.Параметры элементарной ячейки	Электроннографический или рентгеноструктурный анализ	+	+	+	+	+
2.1.4.Микрорельеф поверхности кристаллов (агрегатов)	Визуальная оценка для крупных кристаллов (агрегатов), под биноклем или микроскопом для мелких кристаллов			+	+	+
2.1.5.Морфологические дефекты (трещиноватость, зажимистость, ельчатость, клиновидность и др.)	Визуальная оценка и изучение с применением бинокля			+	+	+

Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
2.2. Фазовый состав						
2.2.1. Химический состав	Полный силикатный анализ (ГОСТ 14328.0-77 – ГОСТ 14328.7-77)	+	+	+	+	+
2.2.2. Примесные элементы	Спектральный анализ, силикатный анализ			+	+	+
2.2.3. Минеральные включения	Визуальное определение; изучение под бинокляром, электронным или поляризационным микроскопом, а также с использованием рентгенографического, инфракрасного (ИКС) ГР, термического или химического анализов			+	+	+
2.2.4. Минеральные загрязнения	Визуальное определение, а также установление с помощью бинокляра или микроскопа			+	+	+
2.2.5. Газовоздушные и водные включения	Визуальное определение, просмотр под бинокляром или микроскопом			+	+	+
2.2.6. Железистость	По коэффициенту железистости $f=(Fe^{2+}+Fe^{3+}) \cdot M_g$			+	+	+
2.3. Физические свойства						
2.3.1. Оптические свойства						
2.3.1.1. Цвет, блеск, прозрачность	Визуальная оценка, определение под бинокляром или с применением поляризационного микроскопа	+	+	+	+	+
2.3.1.2. Показатели преломления	Иммерсионный метод; кристаллооптический			+	+	+
2.3.2. Механические свойства						
2.3.2.1. Плотность	Пикнометрический метод или способ гидростатического взвешивания			+	+	+
2.3.2.2. Твердость	Метод царапания или вдавливания			+	+	+
2.3.2.3. Водопоглощение	По сравнению массы минерала до и после пребывания в воде					+
2.3.2.4. Насыпная масса	Определение массы вещества в определенном объеме			+	+	+
2.3.2.5. Белизна (для мусковита)	По коэффициенту отражения				+	+
2.3.3. Термические свойства						
2.3.3.1. Потери при прокаливании	Уменьшение массы при нагреве				+	+
2.3.3.2. Увеличение при нагреве (для гидрослюд)	Линейное и объемное измерение			+	+	+
2.3.3.3. Теплопроводность (для гидрослюд)	По ГОСТ 7076-87					+
2.3.3.4. Термостойкость	По изменению цвета, прозрачности и целостности кристаллов при нагреве				+	+
2.3.4. Магнитные свойства	По магнитной восприимчивости				+	+
2.4. Устойчивость к агрессивным средам	По растворимости в HCl и KOH				+	+
2.5. Степень кислотности (щелочности)	По pH водной вытяжке				+	+
2.6. Наличие или отсутствие выветривания	Визуальная оценка в совокупности с минералогическими и геологическими исследованиями	+	+	+	+	+
2.7. Установление технологических (промышленных) видов (типов) слюд	Анализ и обобщение результатов определений, указанных в п.п. 2.1-2.6.	+	+	+	+	+
2.8. Радиационно-гигиеническая оценка	По содержанию радионуклидов				+	+
3. Определение содержания мелкозернистых слюд в рудах (породах) с количественной оценкой фракционного состава по крупности кристаллов	По минералу, %, с применением технологических способов извлечения	+	+	+	+	+
4. Разработка принципиальной схемы обогащения мелкозернистых слюд с технической оценкой получаемых концентратов и определением	Получение концентратов слюды способами, имитирующими производственный процесс				+	+

Основные виды работ	Рекомендуемые методы (способы) выполнения	Информация по стадиям геологического изучения				
		Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых			Поисковые работы	Оценочные работы
		Работы М 1:1500000 и мельче, М 1:1000000 (1:500000)	Работы М 1:200000 (1:100000)	Работы М 1:500000 (1:25000)		
технологических показателей обогащения						
5. Оценка возможности промышленного применения мелкоразмерных слюд					+	+
6. Выделение технологических типов (сортов) руд с установлением закономерностей их распределения в недрах исследуемого объекта и их количественного соотношения					+	+
7. Комплексное использование основного полезного ископаемого					+	+

Вмещающие слюду породы. Изучение вмещающих слюду пород производится в едином комплексе при оценке основного полезного ископаемого с целью определения названия, состава и свойств, оказывающих основное влияние на технологию определения содержания и обогащения слюд. Это осуществляется с учетом установления фазового состава (минеральный состав, химический состав, минеральные загрязнения), физических свойств (цвет, текстурно-структурное строение, форма и размеры минералов и минеральных агрегатов, плотность, крепость), взаимоотношение слагающих породу минеральных агрегатов, определения наличия или отсутствия следов выветривания, радиационно-гигиенической оценки. Одновременно рассматривается целесообразность освоения попутных компонентов, присутствующих в слюдосодержащих породах (рудах). Перспективой переработки вскрышных пород для возможного их применения в каком-либо направлении обычно занимаются на более поздних стадиях геологоразведочного процесса, но по желанию заказчика это может быть сделано на ранних стадиях.

По изложенной форме нами был изучен ряд природных (первичных) и техногенных (вторичных) объектов. Например, в 1984-1985 гг. были оценены слюдосодержащие отходы обогащения окисленных и первичных руд Олимпиадинского месторождения золота в Восточной Сибири на возможность и целесообразность получения из них мусковитовых концентратов фракции крупности $-0.050+0.0$ мм. В 1989-1993 гг. проведена оценка 5-ти мусковитоносных объектов Болгарии, 2-х месторождений мелкоразмерного мусковита и техногенных отходов слюдодобывающей промышленности в Югославии, изучены 2 слюдоносных объекта Казахстана и Киргизстана. В этот же период в Российской Федерации было проведено изучение 4-х техногенных объектов «Карелслюда», 6-ти слюдоносных объектов Мамско-Чуйского района ГОКа «Мамслюда» и Мамско-Чуйской геологоразведочной экспедиции, отходов цеха дробления флогопитовой обогатительной фабрики и в отвальных хвостов слюдовыборочного комплекса ГОКа «Ковдорслюда». В 2000 г. показана возможность получения концентратов попутных мелкоразмерных слюд и кварца из отходов обогащения каолинов Южно-Ушкотинского месторождения в Оренбургской области. В 1999-2003 гг. был открыт и изучен нетрадиционный объект мелкоразмерной природно-диспергированной слюды в России – Саздинское проявление в коре выветривания на Южном Урале в Оренбургской области. Здесь важно отметить, что начальная практическая значимость мусковита была установлена при ГДП-200 по технологическому изучению одной пробы № 806/2 мусковит-кварц-каолинового сырья массой 2.9 кг. Этого было достаточно для определения содержания в породе мусковита, по минералу в %, с применением способов обогащения, выхода концентрата и соответствие его технической характеристики требованиям ГОСТ, а также возможность концентрации попутных компонентов, их применение и т.д. Результаты оценки стали решающим фактором для обоснования постановки и проведения поисковых работ. В 2005 г. начато изучение нового перспективного объекта мелкоразмерных слюд (в основном мусковита и парагонита), расположенного в бассейне р. Кубань.

Эффективность применения технологической минералогии слюд при изучении природных и техногенных объектов заключается в полном определении содержания слюд (по минералу, в %) с природными размерами частиц не только фракции $-20+5.0$ мм, но и фракции $-5(-1)+0.0$ мм. Это позволяет увеличить в 3-6 раз запасы мелкоразмерного мусковита на известных природных и техногенных месторождениях, представленных слюдоносными пегматитами, и выявить запасы на новых объектах. Определение содержания мелкоразмерных слюд и их гранулометрического состава с применением лабораторного унифицированного технологического оборудования способствует повышению достоверности учитываемых запасов (ресурсов), а также выявлению и введению в эксплуатацию новых и нетрадиционных для отечественной практики объектов этого вида сырья.

Такой же унифицированный принцип (порядок) изучения технологической минералогии нами своевременно был разработан и применяется в настоящее время при оценке объектов асбеста, вермикулита, графита,

талька, кварцевого песка, гипса, барита и других видов минерального сырья. При этом принимаются во внимание физические, химические, технические и технологические особенности каждого минерального индивидуума. По результатам исследований расширенной технологической минералогии у геологов практически всегда меняется представление об изучаемых объектах в лучшую сторону, вплоть до генезиса основного полезного ископаемого, нежели это было бы изучено ими традиционно на основании одних петрографических и аналитических способов оценки. В этом случае объект познается непосредственно по данным прямых технологических испытаний, а не по аналогии с какими-либо известными прототипами, что часто приводит к сомнительным выводам о значимости изучаемого объекта.

Комплексное использование недр

Комплексное использование основного полезного ископаемого. По размеру частиц природная слюда, находящаяся в породных отвалах и недрах, отвечает мелкозернистой слюде промышленного типа «Слюда дробленая» – чешуйки размером в поперечнике от 0.16 до 15 мм, и типа «Слюда молотая» – порошокобразный продукт с размером частиц меньше 0.315 мм (ГОСТ 10698-80 «Слюда. Типы, марки и основные параметры»). Возможные области перспективного применения мелкозернистых слюд, судя по их фракционному составу, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Необходимый размер частиц слюды для выбора целенаправленного применения

Направления и области применения	Ориентировочный размер частиц, мм
Производство слюдяной бумаги и на ее основе электроизоляционных слюдопластовых и слюдитовых изделий	10-15
Производство рубероида. Буровые суспензии, кровельное производство, кабельная промышленность	0.16-15
Изготовление противопожарных, кислото- и щелочеустойчивых материалов	0-5
Авиационная промышленность	0-2,6
Производство сварочных электродов	0-2
Бумажные покрытия, керамика, изготовление химически устойчивых, водо-, жаро- и морозостойких покрытий	0-0.315
Резинотехническая промышленность, производство органо-силикатных материалов	0-0.16
Производство обоев, наполнители пластмасс, линолеума, смазки	0-0.125
Наполнители для лакокрасочных материалов	0-0.053
Производство бетонов	0-15
Сырье для скрапа	4-20(-40)

Помимо установления традиционных областей использования мелкозернистых слюд, должны проводиться работы по выявлению новых направлений их применения.

Комплексное использование слюдяных руд. Кроме основного полезного ископаемого в рудах могут присутствовать полевой шпат, кварц, каолинит, монтмориллонит и другие минералы, которые представляют промышленный интерес, как в мономинеральном виде, так и в сочетании с присутствующими компонентами (в виде концентратов, неклассифицированных отходов, образований и т.д.). При этом эффективность освоения слюдяных руд значительно повышается. На примере технологической схемы безотходного обогащения слюдяных руд Саздинского проявления она может быть увеличена за счет извлечения и использования кварца и каолинита. Суммарная стоимость их при переработке 1 т руды может приближаться к цене основного полезного ископаемого и составлять 29.47 ф. ст. или 81.90 % от стоимости извлекаемого мусковита. С учетом мировых цен на неметаллические полезные ископаемые ориентировочная общая цена получаемых видов товарной продукции приведена в таблице 5.

Таблица 5

Ориентировочная цена товарной продукции, получаемой при обогащении слюдяных руд Саздинского объекта

Товар	Выход из 1 тонны руды, т	Средняя цена за 1 тонну, ф. ст.	Общая стоимость, ф. ст.
Мусковитовый (слюдяной) концентрат фракции –15+0.0 мм (приравнено к слюде сухого помола)	0.120	300	36
Кварцевый концентрат фракции –15+0.05 мм (приравнено к песку кварцевому литейных и стекольных песков)	0.422	52.5	7.32
Каолин обогатленный фракции –0.050-0.0 мм (приравнено к каолину для наполнителя)	0.422	52.5	22.15
Итого	1.00		65.47

На Олимпиадинском месторождении золота благоприятный вещественный и гранулометрический состав вторичных твердых отходов, формирующихся после извлечения тонкомолотых слюд, позволяет прогнозировать применение их в качестве заменителя естественных кварцевых песков, в производстве песка для строительных работ, в качестве мелкого заполнителя строительных растворов и бетонов, минерального порошка для асфальтобетонных смесей и т.д.

Кварц-полевошпатовые продукты в достаточных объемах можно получить после извлечения мелкозернистой слюды при переделе техногенных образований от выборки крупнокристаллической слюды (на примере ГОКа «Карелслюда»). По результатам прямых испытаний они пригодны для производства технического и оконного стекла, санитарно-керамических изделий, отделочных и облицовочных плит, легких композиционных материалов с объемной плотностью от 110 до 350 кг/м³ и в других направлениях [8].

Кварцевые и кварц-полевошпатовые концентраты, образующиеся после извлечения мелкозернистого мусковита при переделе отходов обогащения каолинов Южно-Ушкотинского месторождения, согласно нормативам соответствующих ГОСТ отвечают требованиям промышленности. Ориентировочная суммарная цена их превышает стоимость слюдяного концентрата на 16 % (соответственно 12.4 и 10.7 ф. ст.).

Комплексное использование вскрышных пород. Применение вскрышных пород может носить различный характер. Во-первых, в них может присутствовать основное полезное ископаемое при содержании ниже бортового. Такие слюдосодержащие породы неизбежно могут попадать в обогатительный передел в качестве разубоживающих пород при отработке приконтактных тел основного полезного ископаемого. Частично они специально направляются на обогащение совместно с добываемыми чрезмерно богатыми по содержанию слюдой рудами. В другом случае, вмещающие породы (например, каолинит и монтмориллонит Саздинского слюдоносного объекта) являются пригодными в качестве минерального сырья для производства тех или иных строительных и другого вида материалов.

Геолого-технологическое картирование месторождений

Геолого-технологическое картирование (ГТК) месторождений является обязательным при оценке качества минерального сырья.

При геолого-технологическом картировании (ГТК) определяются природные разновидности, выделяются технологические типы и сорта слюдосодержащего сырья, закономерности размещения и количественного соотношения их в объеме месторождения, устанавливается их состав, технологические свойства, распределение ценных и вредных компонентов по минеральным формам.

К технологическому картированию месторождений слюды можно отнести работы по определению содержания слюды, технологический процесс которых базируется на принципах обогащения слюдяных руд и позволяет определять не только общее содержание полезного минерала, но и распределение его по фракциям крупности.

В целом ГТК месторождений слюды можно подразделить на два вида – полное ГТК, включающее операции по определению содержания и определения технологических свойств, и сокращенное (неполное) ГТК, состоящее из операции по определению содержания полезного компонента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 01.01. 2004 г. Вып. 56. Мусковит мелкозернистый. М.: Российский Федеральный геологический фонд, 2004. - 40с.
2. Инструкция по применению классификации запасов к месторождениям слюды (мусковита, флогопита, вермикулита). М.: ГКЗ СССР, 1983.
3. Лузин В.П., Горбачев Б.Ф. Мелкозернистые слюды // Нетрадиционные виды нерудного минерального сырья. М.: Недра, 1990. - С. 248-257.
4. Романович И.Ф. Месторождения неметаллических полезных ископаемых. М.: Недра, 1986.
5. Патент 2139529 (Россия). Способ определения природных разновидностей слюд / Лузин В.П., Лузина Л.П. – Заявл. 11.09.97; опубл. 10.10.99. Бюл. № 28.
6. А.с. 1344419 (СССР). Способ обогащения мелкозернистого мусковита / Лузин В.П., Лузина Л.П. – Заявл. 25.11.85; опубл. 15.10.87. Бюл. № 38.
7. Патент 2051752 (Россия). Способ обогащения мелкозернистого мусковита / Лузин В.П., Лузина Л.П., Ведерников Н.Н. – Заявл. 14.09.93; опубл. 10.01.96. Бюл. № 1.
8. Патент 2110538 (Россия). Состав для композиционного материала / Кузнецова О.Н., Архиреев В.П., Лузин В.П., Лузина Л.П., Дударева Е. С. – Заявл. 16.07. 96 г.; опубл. 10.05.98. Бюл. № 13.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН

*Трофимова Ф.А., Лыгина Т.З., Сабитов А.А., Губайдуллина А.М.,
Пермяков Е.Н., Шамсемухаметова И.В., Шинкарев А.А.*

ФГУП ЦНИИГеолнеруд, г. Казань; root@geolnerud.mi.ru

Бентониты – это глинистые породы, обладающие высокой связующей способностью, ионообменными, поглотительными и отбеливающими свойствами, а их водные суспензии – тиксотропией. Эти ценные практи-

ческие свойства обуславливают широкий спектр использования бентонитов во многих областях народного хозяйства и предъявляют к ним высокие требования по качеству.

Месторождения высококачественных бентонитов и созданные на их базе горнодобывающие и перерабатывающие предприятия остались за пределами России – в Закавказье, в Средней Азии, на Украине. Балансовые запасы бентонитов в России на 01.01.2005 г. составляют 27,5 млн. т (или более 0,5% мировых), из них разведанные – 20,7 млн.т. В настоящее время Россия производит около 200 тыс.т щелочных бентопродуктов (порошки и активированный комовый бентонит). Собственное производство не удовлетворяет потребности России в бентонитах и примерно 300 тыс.т ежегодно импортируется из стран СНГ, Греции, Индии, Болгарии, Польши, Венгрии, Германии. К 2020 г. потребности металлургического, машиностроительного и нефтегазового комплексов в щелочном бентоните могут превысить 2 млн.т., что может быть обеспечено собственным производством лишь на 30%.

Создавшаяся ситуация вынуждает не только увеличивать объем поисковых и поисково-оценочных работ, но и разрабатывать новые эффективные технологии модифицирования щелочноземельных бентонитовых глин с целью повышения качества бентонитовой продукции. Исследования последних лет и мировая практика показали, что применение специальных методов модифицирования позволяют получить из щелочноземельных бентопорошков высококачественные тонкодисперсные глинопорошки.

Дисперсность глинистых минералов – преимущественный критерий, определяющий их основные физико-химические свойства: способность к сорбции, ионному обмену, каталитическому действию, тиксотропному коагуляционному структурообразованию, т.е. свойства, связанные с эффективной поверхностью кристаллов. Вместе с тем важно отметить, что гидрофильность, ионообменная способность становятся тем более высокими, чем несовершенней кристаллическая структура глинистого минерала, и наоборот, эти значения минимальны для совершенных по структуре кристаллов. Такая зависимость благоприятна для регулирования свойств глинистых минералов.

В данной работе показано влияние на коллоидно-химические свойства глин механоактивационных процессов, при которых не только возрастают дисперсность и удельная поверхность глинистых частиц, но и повышается их реакционная способность.

Для регулирования свойств глинистых минералов в процессе механоактивации важно детально изучить кристаллическую структуру монтмориллонита, являющегося основным пороодообразующим компонентом.

Кристаллическая структура монтмориллонита (ММ) представляет взаимосвязь трех составляющих элементов матрицы – силикатного слоя с избыточным отрицательным зарядом, положительно заряженных компенсаторов этого заряда – внеслоевых (обменных) катионов и молекулярносвязанной воды, выполняющей функцию нейтрализатора (-) и (+) зарядов [1].

Молекулярносвязанная вода в структуре монтмориллонита наиболее изменчива в количественном отношении, поскольку монтмориллонитовые глины являются открытыми системами, весьма чувствительными к концентрации паров воды в воздухе. Единство и устойчивость триадной структуры ММ обеспечивается активной ролью молекул воды в компенсации как (+) зарядов обменных катионов (координационные связи), так и (-) зарядов силикатных слоев (донорно-акцепторные – гидроксильные связи).

В структуре ММ молекулярносвязанная вода представлена в виде трех форм. Молекулы первой формы – наиболее прочно связанной воды частично погружены в гексагональные углубления кремнекислородной сетки и образуют донорно-акцепторную связь с ионами кислорода гидроксильной группы, несущими избыточный (-) заряд. Эти молекулы воды не только компенсируют (-) заряд в октаэдрической сетке, но и служат мостиком между силикатным слоем и молекулами воды межслоевых промежутков, благодаря образованию дополнительных водородных связей. Вторая форма – молекулы воды, координационно связанные межслоевыми катионами с образованием аквакатионов. Молекулы третьей формы воды формируются в виде пространственной сетки гидратно-ионных слоев при достаточной влажности. Молекулы третьей формы воды образуют между собой и с молекулами других форм воды водородные связи.[2]

Степень диспергирования глинистых частиц в процессе механоактивации во многом определяется энергетическим состоянием минеральной системы и дефектностью кристаллической структуры. Дефектность структуры монтмориллонита может возникать за счет замещения Si^{4+} на Al^{3+} в тетраэдрических позициях и Al^{3+} и Fe^{3+} на Mg^{2+} в октаэдрических положениях, за счет наличия вакансий в структуре диоктаэдрического слоя и искажения анионной кислородной сетки. Таким образом, при механическом диспергировании глины разрушение происходит сначала по дефектным зонам срастания зерен минерала, а при более тонком и сверхтонком диспергировании при наличии дефектных зон в кристаллической структуре глинистого минерала, описанных выше, идет процесс разрушения структуры кристаллитов. [3]

Влияние механоактивационного воздействия на коллоидные и реологические свойства исследовано на примере щелочного бентонита Тихменевского месторождения (о-в Сахалин), щелочно-щелочноземельного бентонита месторождения Десятый Хутор (Республика Хакасия), щелочноземельной бентонитоподобной глины Березовского месторождения (Республика Татарстан), отличающиеся по минеральному и химическому составу.

Состав и свойства бентонитов и глины были изучены с применением комплекса аналитических методов, включающего химический силикатный анализ, определение состава катионного обменного комплекса, рентгенографический фазовый анализ, термоаналитические исследования, метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) и адсорбционный люминесцентный анализ (АЛА).

Основным источником информации о минеральном составе явились результаты рентгенографического анализа. Исследования проводились на рентгеновском дифрактометре D8.ADVANCE (фирма Bruker) с использованием монохроматизированного $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Дифрактограммы ориентированных препаратов приведены на рис 1.

В бентонитовой глине Тихменевского месторождения, помимо монтмориллонита, фиксируются примеси неглинистых минералов – кристобалита, кварца, плагиоклаза. Содержание монтмориллонита по данным рентгенографического количественного анализа (метод внутреннего стандарта, аналитический рефлекс монтмориллонита 06,33 с $d=0,1496\text{ нм}$, внутренний стандарт - корунд) составляет $75\pm 3\%$ масс. На дифрактограммах как неориентированных, так и ориентированных воздушно-сухих препаратов отчетливо наблюдается рефлекс со значением 2,2-2,3 нм (рис 1А), следующий интенсивный базальный рефлекс имеет значение $d=1,25\text{ нм}$. Остальные базальные рефлексы являются широкими, сильно размытыми и не образуют целочисленной серии. Это свидетельствует о смешаннослойной природе описываемого минерала, обусловленной чередованием в его структуре с тенденцией к упорядочению пакетов с различным содержанием слоев воды между силикатными 2:1 – слоями. В пользу такого предположения свидетельствуют дифракционные картины препаратов, насыщенных глицерином и прокаленных при 300°C . В обоих случаях фиксируются строгие целочисленные серии базальных рефлексов, типичные для монтмориллонит-глицеринового комплекса и дегидратированного монтмориллонита (рис 1А).

Бентонитовая глина месторождения Десятый Хутор сложена монтмориллонитом ($74\pm 3\%$ по данным рентгенографического количественного анализа) с примесью 7-10% каолинита. Неглинистые минералы представлены кварцем, полевыми шпатами. Значение первого базального рефлекса в воздушно-сухом состоянии равно 1,32-1,33 нм. Со стороны малых углов наблюдается слабое размытое плечо со значением примерно 2,1-2,0 нм, что, как и в предыдущем случае указывает на слабую степень смешаннослойности. После насыщения препаратов глицерином и прокаливании при 300°C на дифрактограммах образуются целочисленные серии базальных рефлексов, типичные для монтмориллонита (рис. 1Б).

Для бентонитоподобной глины Березовского месторождения характерен полиминеральный состав глинистой фракции. Доминирующей фазой является монтмориллонит ($52\pm 3\%$), кроме того, присутствует слюда ($7\pm 2\%$), каолинит ($5\pm 1\%$), хлорит ($2\pm 1\%$). Неглинистые минералы представлены кварцем и плагиоклазом. Первое базальное отражение имеет значение $d_{001}=1,45\text{ нм}$. После насыщения глицерином и прокаливании при 300°C на дифрактограммах фиксируются целочисленные серии базальных рефлексов (рис. 1В).

Монтмориллонитовые минералы в глинах всех трех рассматриваемых месторождений – диоктаэдрические, значения параметров b_0 колеблются в пределах 0,902-0,898. Термоаналитические исследования бентонитовых глин изучаемых месторождений проводились на синхронном термоанализаторе STA 409 PC Luxx (фирма Неч, Германия).

Для этих образцов регистрируются в низкотемпературной области эндотермический эффект дегидратации и в высокотемпературной области – эндотермический эффект дегидроксилизации (рис.2). Сравнительная оценка типа обменного комплекса производится по соотношению величин потери массы в процессе дегидратации при двух разных влажностях воздуха $\text{ПМ}^{0,92}$ и $\text{ПМ}^{0,43}$. Такой подход позволяет определить состав катионного комплекса монтмориллонита в бентонитовом сырье методами термического анализа с помощью параметра $K_1 = \text{ПМ}^{0,92}/\text{ПМ}^{0,43}$

Несмотря на кажущуюся однотипность термического поведения изученных бентонитовых глин, детальный анализ конфигурации, интервалов температур и значений потери массы образцами в выделенных интервалах проявляются индивидуальные особенности каждого типа (табл.1, рис.3). Так сопоставление дифференциальных термических (ДТГ) кривых (рис.3), позволяет выявить различие в интервалах дегидроксилизации. Глина Березовского месторождения характеризуется двухэтапной низкотемпературной дегидроксилизацией (интервал $271-413^\circ\text{C}$ и $420-700^\circ\text{C}$). Бентонитовая глина месторождения Десятый Хутор проявляет двухэтапную высокотемпературную дегидроксилизацию (интервал $371-564^\circ\text{C}$ и $564-807^\circ\text{C}$). Бентонитовая глина Тихменевского месторождения отличается тем, что проявляет одноэтапную высокотемпературную дегидроксилизацию (интервал $542-786^\circ\text{C}$).

Дополнительную информацию по кристаллохимическим особенностям монтмориллонита дает метод адсорбционного люминесцентного анализа (АЛА) [4] (табл.2). Метод АЛА, после определения величины обменной емкости (ОЕ) и обменной способности (ОС) глин, позволяет рассчитать среднее число силикатных слоев в единичной микрочастице:

$$N = \text{ОЕ}/\text{ОС},$$

и величину активной поверхности $S_{\text{акт}}$ глиномассы в отношении осмотического набухания и адсорбции:

$$S_{\text{акт}} = \text{ОС}/\text{ОЕ} * 750 \text{ м}^2/\text{г}$$

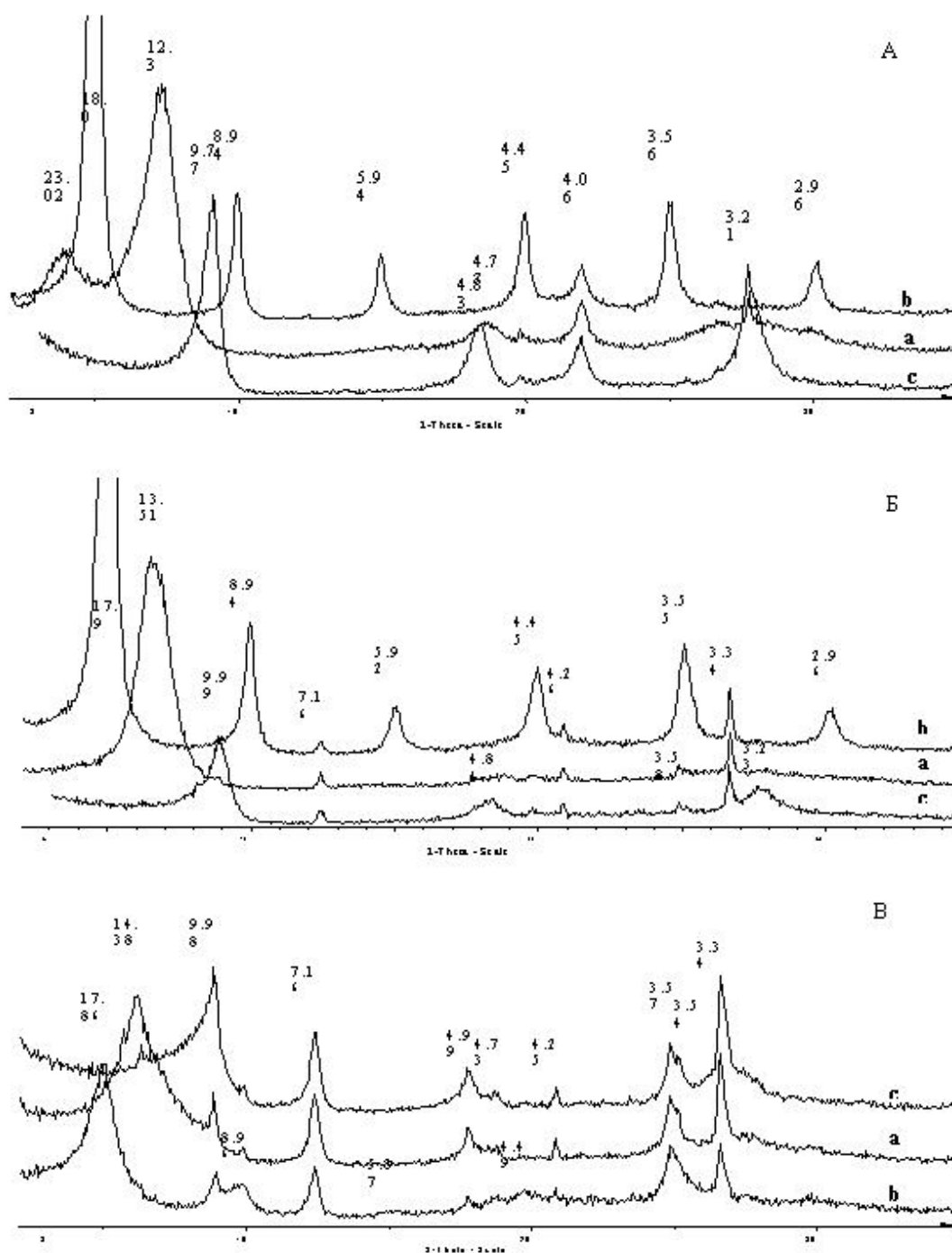


Рис.1. Дифрактограммы бентонитовых глин:
А – Тихменевского месторождения; Б – месторождения Десятый Хутор; В – Бerezовского месторождения.
 а – ориентированные в воздушно-сухом состоянии; б – сольватированные глицерином; с – прокаленные при 300°C 1 час.

Таблица 1

Результаты ТГ-ДСК исследований

Месторождение	Потеря массы, %, в интервале температур 30-350°C		Содержание Монтмориллонита, % масс.	K ₁	Тип обменного комплекса	Температурный интервал дегидроксилизации °C	Интегральная потеря массы (30-1000° P/P ₀ =0,43)
	P/P ₀ =0,43	P/P ₀ =0,92					
Березовское	8,83	13,83	41	1,5	Щ-з	384-602	11,30
Десятый Хутор	7,27	12,35	48	1,7	Щ-ш-з	543-778	14,64
Тихменевское	9,87	19,57	75	2,0	Щ	563-757	15,53

Величина обменной емкости (ОЕ) высокая у глины Тихменевского месторождения – 77 мг.экв., число глинистости – более 400 усл.ед., высота всплывающего коагулята достигает 27 мм, обменная способность глины – 57 мг.экв., это указывает на то, что в пробе содержится высокодисперсный монтмориллонит с высокой адсорбционной способностью, имеющий развитую активную поверхность 560 м²/г, при минимальном количестве силикатных слоев (1-2) в единичной матрице глины, разделенных одновалентными обменными катионами.

Бентонитовая глина месторождения Десятый Хутор имеет ОЕ равную 67 мг.экв., число глинистости высокое – 188 усл.ед, высота всплывающего коагулята – 18 мм. Однако ОС у данной глины невысокая – 27мг.экв., всплывающий коагулят отсутствует, наблюдается лишь осевший коагулят высотой 4 мм. Это свидетельствует о том, что при достаточно высокой активной поверхности 330 м²/г, раскрывающейся при обработке глины Na-содержащей солью, строение микрочастиц - тактоидов ограничено двумя-тремя силикатными слоями (N=2-3), межслоевые обменные катионы – смешанного характера (Na,K,Ca, Mg).

Глина Березовского месторождения имеет низкую обменную емкость – 52 мг.экв., число глинистости – 94 усл.ед., высоту всплывающего коагулята – 12 мм, Обменная способность ее равна 13 мг.экв, имеется небольшая осевший коагулят – 3 мм. Это щелочноземельная глина в составе обменных катионов преимущественно ионы Ca²⁺ и Mg²⁺, микрочастицы – многослойные кристаллиты (N>4) с низкой величиной активной поверхности – 190 м²/г. Кроме того такие кристаллиты в глиняном пласте образуют водопрочные микроагрегаты и даже агрегаты.

По данным статической влагоемкости (СВ) глина Тихменевского месторождения при давлении паров P/P₀=0,92, когда происходит завершение формирования мономолекулярного гидратного слоя на всех базальных силикатных поверхностях, поглощает воды больше, чем глины двух других изучаемых месторождений.

Повышенный коэффициент $K = \frac{H_2O(p/p_0 = 0,92)}{H_2O(p/p_0 = 0,43)}$ у глины Тихменевского месторождения так же го-

ворит о явно выраженной микропористости структуры и поглощении микрокапиллярной воды.

Роль воды является очень важной для повышения эффективности механоактивации глинистых частиц. Вода необходима в диспергируемой глине в количестве, достаточном для достижения предельно-гидратированного состояния разбухающих слоев и гидрофилизации новой поверхности, что соответствует влажности, близкой к гигроскопической при относительном давлении паров воды, равном единице.

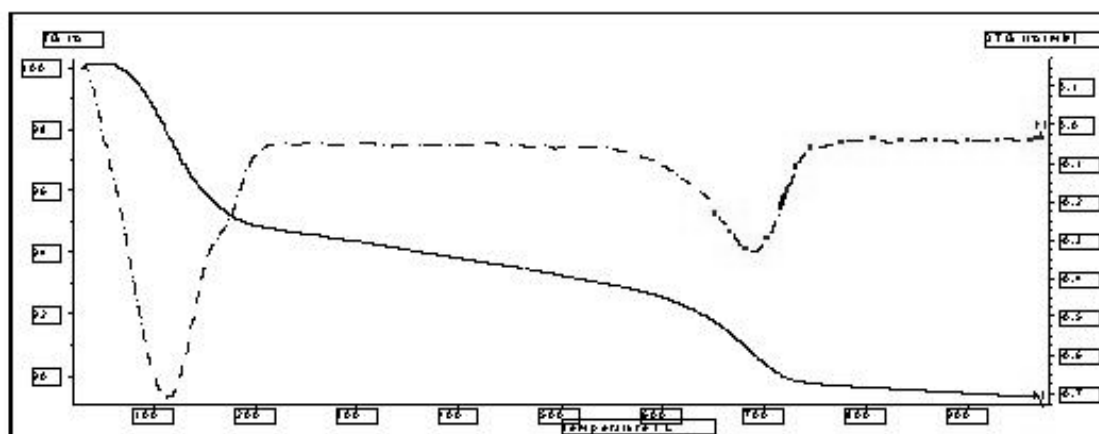
В глинопорошках при наличии достаточной доли коагуляционной фазы в межслоевых промежутках некоторой части микрочастиц формируются гидратно-ионные слои, включающие пространственную сетку третьей формы молекулярносвязанной воды, толщина которой превышает диаметр аквакатиона. Значительная доля этой воды приходится на адсорбционно-связанную, которая при механической активации исполняет роль расклинивающего фактора. Вследствие этого аквакатионы оказываются смещёнными относительно ранее локализованных положений. В результате силы сцепления между силикатными слоями ослабляются, и соответствующие силикатные слои и микрочастицы получают импульс скольжения с повышенной амплитудой колебания на сетке молекул воды третьей формы. Участвуют в колебательном движении и межслоевые катионы. Этот механизм проявляется и в многослойных кристаллитах, благодаря чему, хотя и кратковременно, по крайней мере, у части силикатных слоёв, обнажаются базальные поверхности и находящиеся на них катионы Ca²⁺, которые можно обменять на энергетически более выгодные одновалентные катионы Na⁺.

Таким образом, пространственная сетка из молекул воды третьей формы выполняет ряд важных функций: является перераспределителем кинетической энергии на аквакатионы и силикатные слои, повышает колебательное движение и поверхностное скольжение смежных силикатных слоёв, служит каналом для перемещения катионов и обмена их на одновалентные катионы.

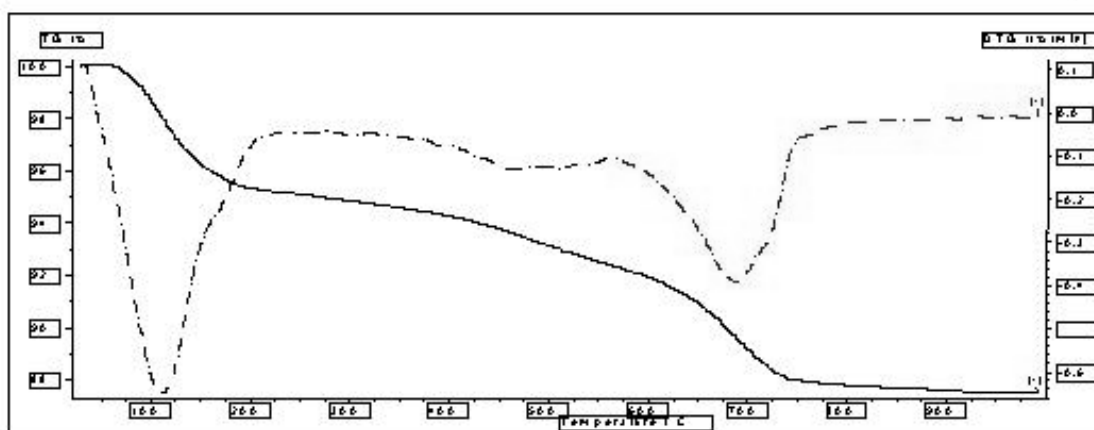
На основе механизма воздействия давления сдвига разработан способ получения эффективных глинопорошков для буровых растворов путем одновременного истирания в вибромельнице смеси глинопорошка, включающего коагуляционную фазу с добавкой карбоната натрия и оксида магния. [5] Для обеспечения оптимальной влажности смеси во время активации, карбонат натрия вводят взбрызгиванием водного раствора в глину, что облегчает и ускоряет активное их взаимодействие и изменение свойств глинистых частиц: ионы Na⁺ замещают обменные ионы Ca²⁺. После помещения такой глины в водный раствор, глинистые частицы переходят в высокодисперсное состояние с максимальной активной поверхностью для связывания воды, что влечет за собой набухание глинистых частиц и рост вязкости глинистого раствора.

При меньшей влажности глины и, особенно, использование воздушно-сухих образцов при измельчении в вибромельнице почти не идет обмен Ca²⁺ на Na⁺. Их взаимодействие идет только после помещения глинопорошка в воду, но механически поглощенные соли в этих условиях слабо взаимодействуют с глинистыми частицами; выход бурового раствора в несколько раз ниже, чем у глинопорошков подвергнутых механоактивации при более высокой влажности. На примере глины Березовского месторождения показана зависимость выхода бурового раствора от влажности, при которой производится механохимическая активация (табл.3).

А



Б



В

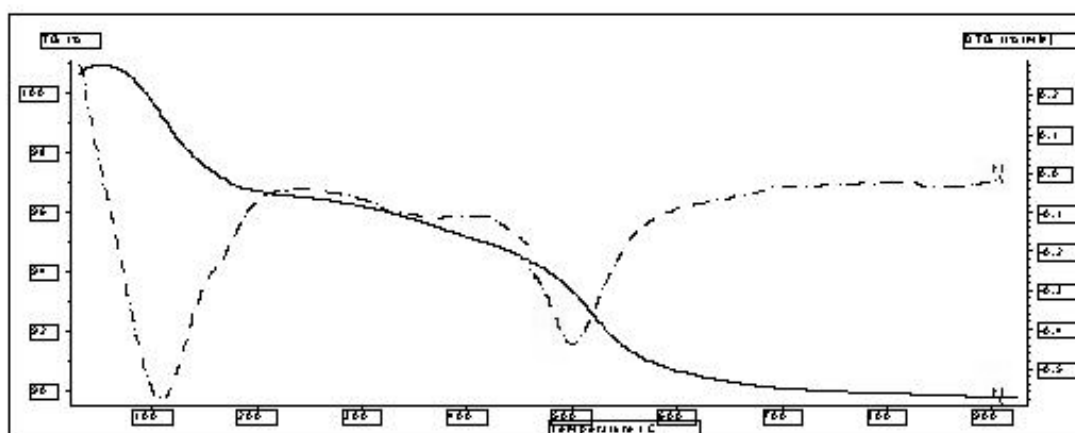


Рис.2. ТГ-ДТГ кривые бентонитов различных кристаллохимических типов:

А – Тихменевское месторождение; Б – месторождение Десятый Хутор; В – Березовское месторождение.

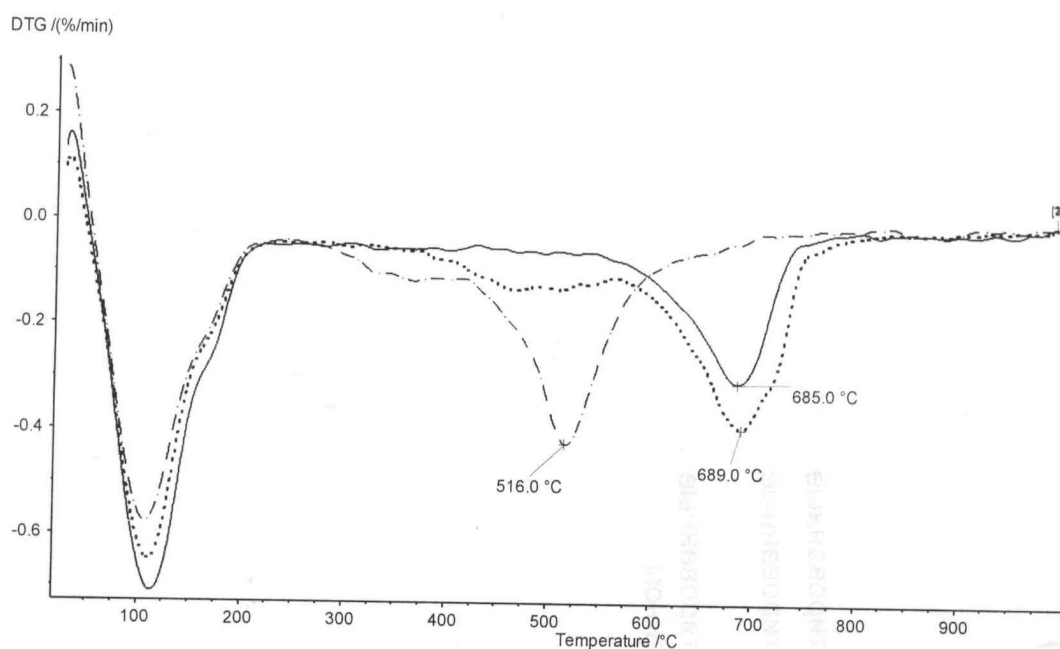


Рис.3. Сопоставление дифференциальных термических (ДТГ) кривых

Таблица 2

Минералого-технологические характеристики глинистого сырья

Место-рождение	АЛЖ							СВ			Активная поверхность $S_{акт}$, м ²	Число силикатных слоев, п, ед.	Коло Идальность, %
	ОЕ, мг·экв	С _{гль} усл. ед.	Н ₁ , мм	Н ₂ , мм	ОС, мг·экв	Н ₁ , мм	Н ₂ , мм	Н ₂ О% при р/р ₀ =0,92	К	МК, %			
Тихменевское	77	425	27	-	57	10	-	24,58	2,28	777	560	1-2	93
Десятый Хутор	67	181	18	-	27	-	4	17,75	1,93	568	330	2-4	41
Березовское	52	94	12	-	13	-	3	18,63	1,85	553	190	>4	12

Таблица 3

Зависимость выхода бурового раствора от влажности глинопорошка в процессе механохимической активации на примере глины Березовского месторождения

Пример	Влажность глинопорошка, %	Выход бурового раствора, м ³ /т
1	7,7	5,0
2	11,0	5,8
3	13,0	14,0
4	15,0	20,0

Одним из важных условий более эффективного модифицирования бентонитов и глин является необходимость наложения на систему глина-модификаторы высоких внешних механических воздействий. Энергонапряженность механических воздействий должна быть достаточна не только для преодоления сил сцепления между глинистыми частицами через прослойки адсорбционно-связанной воды, но и для появления активных центров и закрепления на них адсорбатов, в том числе и воды.

Реакция перевода щелочноземельного бентонита в Na-форму проходит значительно быстрее и эффективнее при наложении на систему глина-модификаторы давления сдвига, например, при измельчении глинопорошков в вибромельницах и дезинтеграторах. Для вибрационных мельниц характерны сжатие и срез (истирание), вследствие чего аморфизации подвергаются преимущественно поверхностные слои частиц. При измельчении в них, вероятнее всего, происходит возникновение пластических деформаций в поверхностных зонах разломов и трещин под действием сдвиговых напряжений. При механоактивации в вибромельнице в твердодисперсной глинистой системе происходит расщепление тактоидов и кристаллитов и адсорбции на вновь образуемой поверхности воды и реагентов. Связь процесса деформации измельчаемого материала с одновременным вводом химических реагентов, являющихся активными гидрофильными стабилизаторами, создает более благоприятные условия для модификации значительно большей поверхности глинистого материала, чем на необработанной в механоактивационном режиме поверхности твердого тела.

Так, при стандартной технологии модифицирования включающей тонкий помол глины совместно с натрий-содержащими солями в шаровых и роliko-маятниковых мельницах технологические параметры значительно ниже, чем у глин, обработанных способом механохимической активации (табл.4).

Таблица 4

Результаты реологических характеристик бентонитов в зависимости от способа модифицирования

Месторождение	Способ модифицирования	Коллоидальность, %	Эффективная вязкость, Па	Выход бурового раствора, м ³ /т
Тихменевское	Стандартный, 4,4%Na ₂ CO ₃	95,0	28,0	12,0
	Механоактивация, 3% Na ₂ CO ₃ , 3% MgO, W=14,6%	100	82,15	31,0
Десятый Хутор	Стандартный, 3% Na ₂ CO ₃	60	11,5	9,7
	Механоактивация, 3% Na ₂ CO ₃ , 3% MgO, W=15,7%	100	81,5	30,0
Березовское	Стандартный, 6% Na ₂ CO ₃	12,5	3,50	6,6
	Механоактивация, 3% Na ₂ CO ₃ , 3% MgO, W=13%	60,0	30,6	14,5

Таким образом, роль высоких внешних механических воздействий на систему глина-модификаторы очевидна, поскольку в результате давления сдвига, сил трения и пластических деформаций, приводящих к разрыву химических связей и образованию дефектов в структуре, происходит более полное и эффективное взаимодействие глины с химическими реагентами.

Физико-химические и структурные изменения зависят от длительности измельчения и определяются кристаллохимической структурой минерала. Исследуемые объекты были подвергнуты механическому истиранию в вибромельнице с различной продолжительностью времени – 3, 5, 10 и 15 минут. Дисперсность и удельная поверхность, определенные на лазерном дифракционном микроанализаторе размеров частиц «Анализетте-22», у исследуемых образцов при продолжительности механоактивации до 10 минут увеличилась, при увеличении времени активации до 15 минут эти показатели начинают снижаться (рис.4).

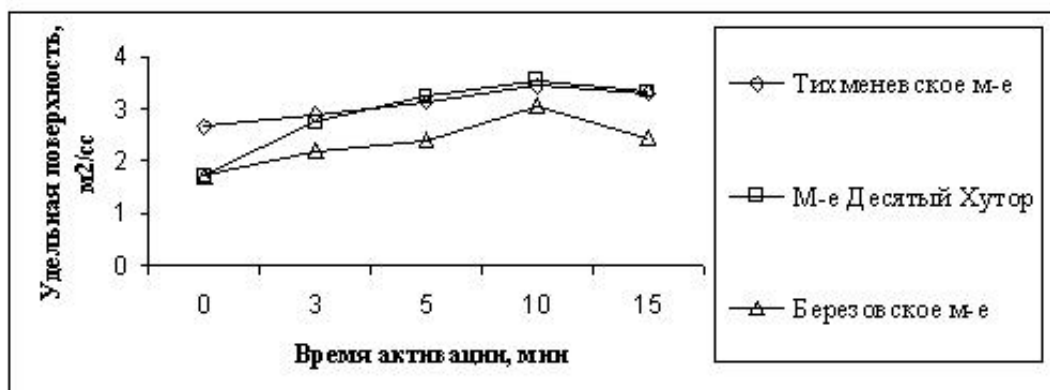


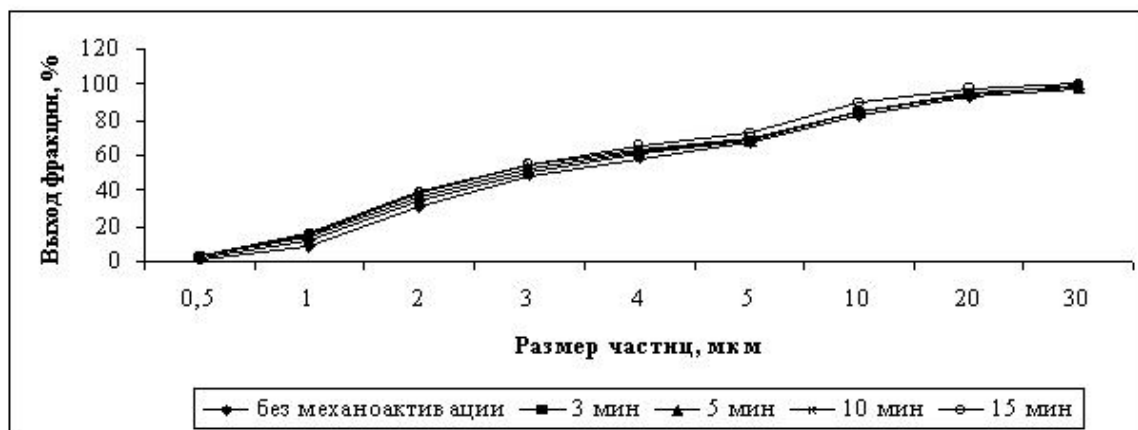
Рис.4. Зависимость удельной поверхности от времени активации

Следует отметить, что исходное глинистое сырье месторождений Березовского и Десятый Хутор относится к среднedisперсному сырью (ФР<10мкм – до 60%), после механоактивации фр<10мкм составляет более 80%, что соответствует высокодисперсному сырью (рис.5 – В, Б). Исходное глинистое сырье Тихменевского месторождения высокодисперсное, фр<10мкм более 90%, поэтому время механического истирания практически не влияет на дисперсность глинистых частиц (рис.5 – А).

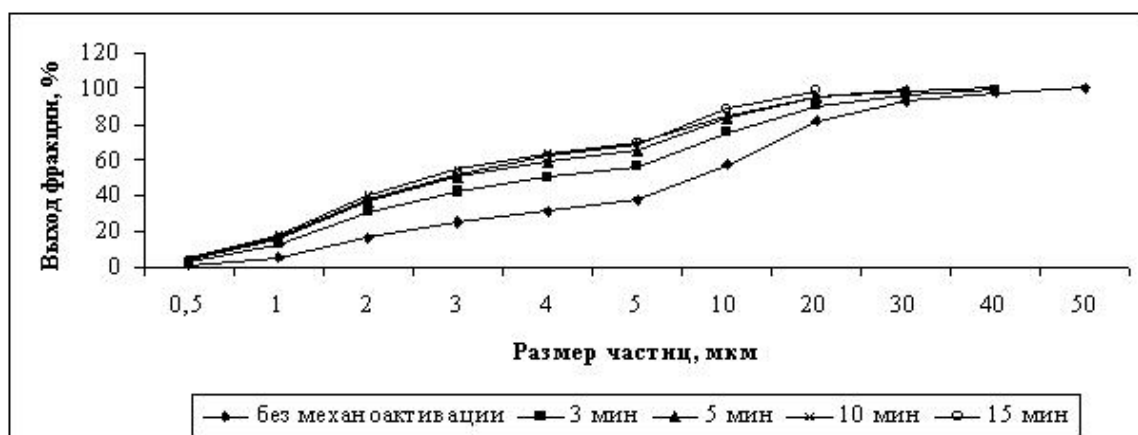
Методом адсорбционного люминесцентного анализа изучено влияние продолжительности механоактивационных процессов на физико-химические свойства природных объектов (табл.5). Глинистое сырье Тихменевского месторождения высокодисперсное, содержание монтмориллонитового компонента 77%, имеет в составе обменного комплекса преимущественно щелочные Na⁺-катионы. Обменная емкость монтмориллонита составляет 82 мг.экв. После механического воздействия продолжительностью до 10 минут величина активной

поверхности глинистых частиц возрастает, увеличивается обменная емкость активированного бентонита до 92 мг.экв, обменная способность до 67 мг.экв., коэффициент K , свидетельствующий об увеличении микропористости структуры возрастает до 2,70. Однако, сырье, имеющее высокие коллоидальные свойства в исходном состоянии и достигающее после 5 минут активации 100% коллоидальности, после 15 минут механического воздействия резко изменяет физико-химические показатели : коллоидальность падает до 72%, обменная способность уменьшается до 62 мг.экв., число глинистости до 140 усл.ед.

А



Б



В

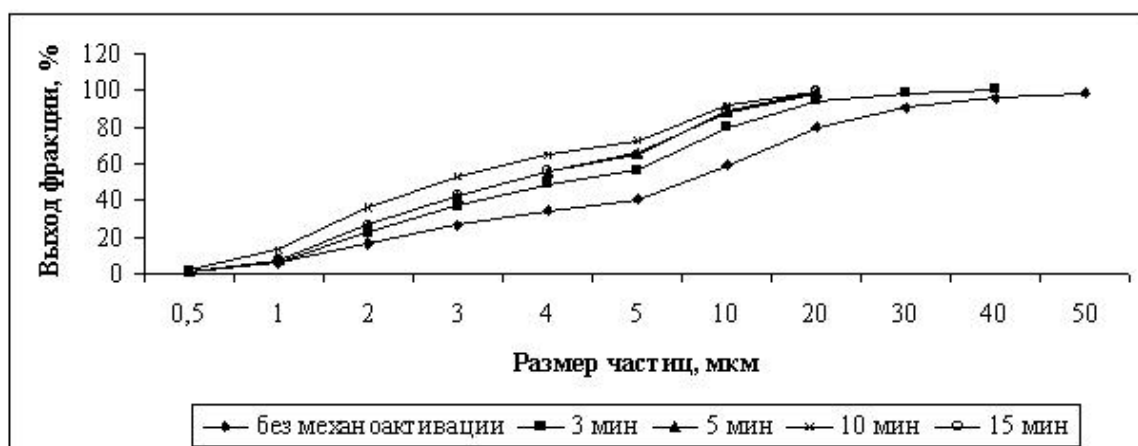


Рис. 5. Зависимость дисперсности глинистых частиц от времени обработки в вибрационной мельнице исходных глин:

А – Тихменевское месторождение; Б – месторождение Десятый Хутор; В – Березовское месторождение

Таблица 5

Влияние механоактивации на минералого-технологические параметры бентонитосодержащих пород

Место-рождение	Способ обработки	АЛА								СВ			Коллоидальность, %
		ОЕ, мг.экв	С _{гп}	Н ₁	Н ₂	ОС мг.экв	С _{гп}	Н ₁	Н ₂	p/p=0,43	p/p=0,92	К	
Березовское	Исх.	52	94	12	–	13	4	–	3	10,17	18,63	1,85	12,67
	3 мин акт	52	138	15	5	18	5	–	3	10,36	19,02	1,84	19,00
	5 мин акт	57	111	13	–	18	6	–	4	10,42	19,49	1,87	19,20
	10 мин акт	57	111	15	–	18	6	–	4	10,53	19,75	1,87	19,77
	15 мин акт	57	180	18	5	18	6	–	4	10,96	20,76	1,89	19,80
Десятый Хутор	Исх.	67	181	18	–	23	9	–	4	9,16	17,75	1,93	41,33
	3 мин акт	67	271	27	–	27	27	4	4	8,70	18,88	2,17	58,67
	5 мин акт	72	400	37	–	32	54	8	5	8,85	19,46	2,19	61,33
	10 мин акт	62	250	27	–	27	21	2	5	8,81	19,30	2,19	49,33
	15 мин акт	52	186	20	–	23	9	–	3	8,72	19,11	2,19	29,33
Тихменевское	Исх.	82	332	27	–	57	86	10	–	10,72	24,58	2,28	93,3
	3 мин акт	92	530	35	–	62	186	20	–	9,23	24,3	2,63	100
	5 мин акт	92	540	30	–	67	350	35	–	9,20	24,85	2,70	100
	10 мин акт	87	390	30	–	62	170	18	–	9,20	24,80	2,69	98
	15 мин акт	82	320	26	–	62	130	14	–	9,19	24,79	2,69	72

Эти изменения можно объяснить тем, что при длительной продолжительности истирания возникает локальное точечное увеличение температуры, третья форма воды удаляется, вода первой формы прочно входит в гексагональные углубления кислородной сетки тетраэдрического слоя, смежные силикатные слои подходят друг к другу на достаточно близкое расстояние, происходит агрегация и спаивание глинистых частиц. Таким образом, при механоактивации воздушно-сухих образцов Тихменевского месторождения самым оптимальным является вариант с продолжительностью активации 5 минут. Данные рентгеновского анализа также показывают, что при 15 минутной активации интенсивность первого базального рефлекса уменьшается, что можно объяснить изменением физических свойств образца и, вероятно, частичным переходом в аморфное состояние (рис.6).

Такая же картина наблюдается и у глинистого сырья месторождения Десятый Хутор. При истирании воздушно-сухих образцов в течение 3 и 5 минут у активированных образцов наблюдается увеличение обменной емкости, числа глинистости монтмориллонита, повышается его обменная способность, что свидетельствует о расщеплении тактоидов, и как следствие увеличение активной поверхности и ее гидрофилизации (коллоидальность возросла до 61% после 5 минут активации, тогда как у исходной глины эта величина составляла 41%). Однако, также как и у образца Тихменевского месторождения, после 15 минут активации такие технологические показатели как обменная емкость, обменная способность и коллоидальность уменьшаются, что вероятнее всего также связано с агрегацией частиц после длительного воздействия на глинистую систему высоких механических напряжений, сил трения и пластических деформаций.

Рентгеновский анализ показывает, что после механического воздействия значение полуширины первого базального рефлекса увеличивается, а величина его интегральной интенсивности начинает снижаться уже после 5 минут активации, что вероятнее всего связано с агрегацией частиц, которые после обработки в механоактивационном режиме теряют гидрофильные свойства и не дают хорошо ориентированных препаратов. (рис.7).

Природное глинистое сырье Березовского месторождения с относительно малым содержанием монтмориллонита 52%, структура которого состоит из многослойных кристаллитов, содержащих межслоевые щелочно-земельные катионы, слабо реагирует на механическое воздействие. Обменная емкость активированного бентонита возрастает до 57 мг.экв., обменная способность практически не изменяется, адсорбционные свойства ММ по количеству воды, адсорбированной при высокой влажности при $P/P_0 = 0,92$ и при влажности, близкой к воздушно-сухому состоянию при $P/P_0 = 0,43$ увеличиваются незначительно и, как следствие, гидрофильные свойства глины Березовского месторождения, представленные числом коллоидальности, изменяются от 12,7% для исходного образца до 19,8% для активированного.

Рентгеновский анализ показал, что Березовская бентонитоподобная глина среднedisперсного состава при механическом истирании в вибромельнице претерпевает лишь разрушение по дефектным зонам срастания зерен минералов, что также подтверждается увеличением полуширины первого базального рефлекса. Значение интегральной интенсивности дифракционного рефлекса 001 с увеличением времени активации уменьшается, что, скорее всего, связано с трудностью приготовления хорошо ориентированных препаратов, т.к. глина имеет низкие гидрофильные свойства (рис.8). Для качественного изменения свойств Березовской глины необходимо дополнительно с процессом механоактивации вводить химические реагенты обладающие гидрофильными стабилизирующими свойствами. Так при механоактивации глины Березовского месторождения в присутствии 3%Na₂CO₃ и 3%MgO в течение 5 минут при влажности этой смеси 11%, адсорбционные свойства по воде увеличились $K=2,16$, а коллоидальность возросла до 45%. По данным рентгеновского анализа значение интегральной интенсивности дифференциального рефлекса увеличилась до 1342 (у исходного образца она составляла 1138), полуширина первого базального рефлекса увеличилась до 1,50 (у исходного –

1,28), что свидетельствует о том, что в результате механоактивации глины совместно с химическими реагентами у части силикатных слоев обнажаются базальные поверхности, находящиеся на них межслоевые катионы Ca^{2+} в присутствии солей обмениваются на Na^{+} –катионы, которые притягивают к себе больше молекул воды, что приводит к возрастанию гидрофильной способности глины.

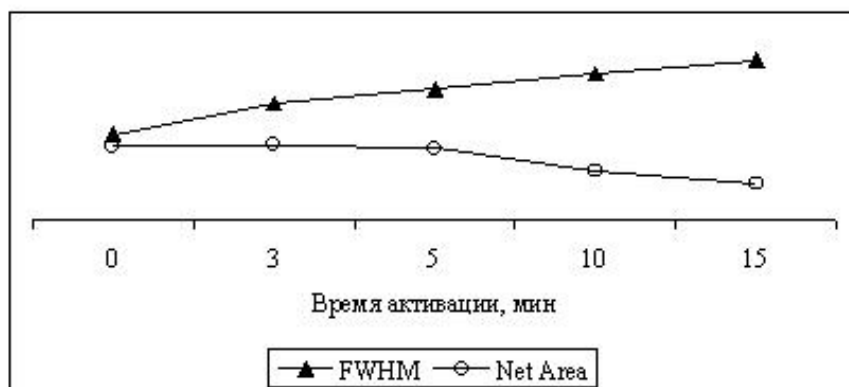


Рис. 6. Зависимость интегральной интенсивности (Net Area) и полуширины дифракционного рефлекса 001 (FWHM) от времени активации для пробы Тихменевского месторождения.

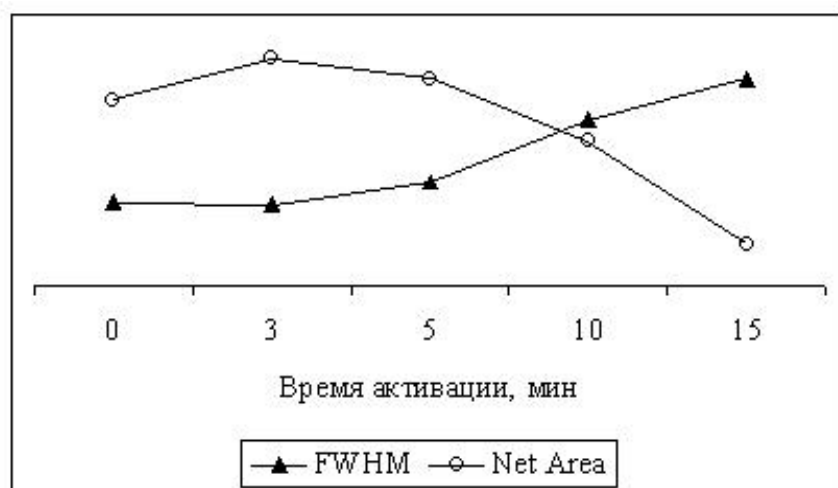


Рис. 7. Зависимость интегральной интенсивности (Net Area) и полуширины дифракционного рефлекса 001 (FWHM) от времени активации для пробы месторождения Десятый Хутор

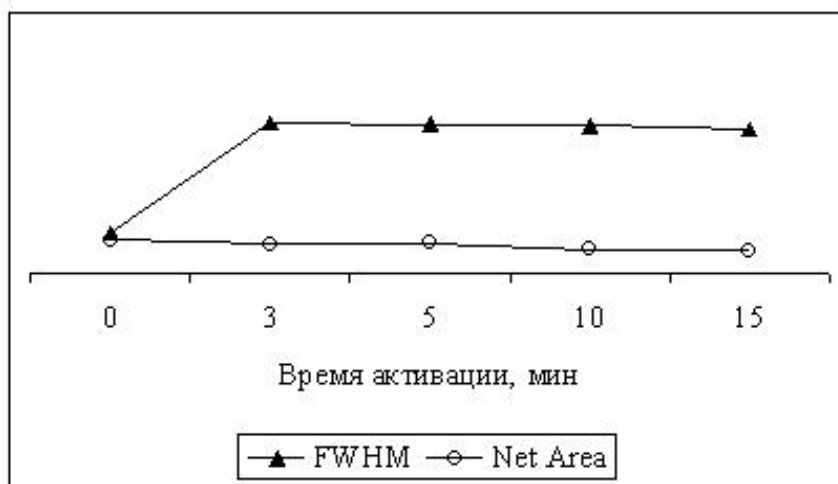


Рис.8. Зависимость интегральной интенсивности (Net Area) и полуширины дифракционного рефлекса 001 (FWHM) от времени активации для пробы Березовского месторождения

На рис.9 показаны изменения физико-химических и реологических показателей в результате механической активации исследуемых глин в присутствии химических реагентов.

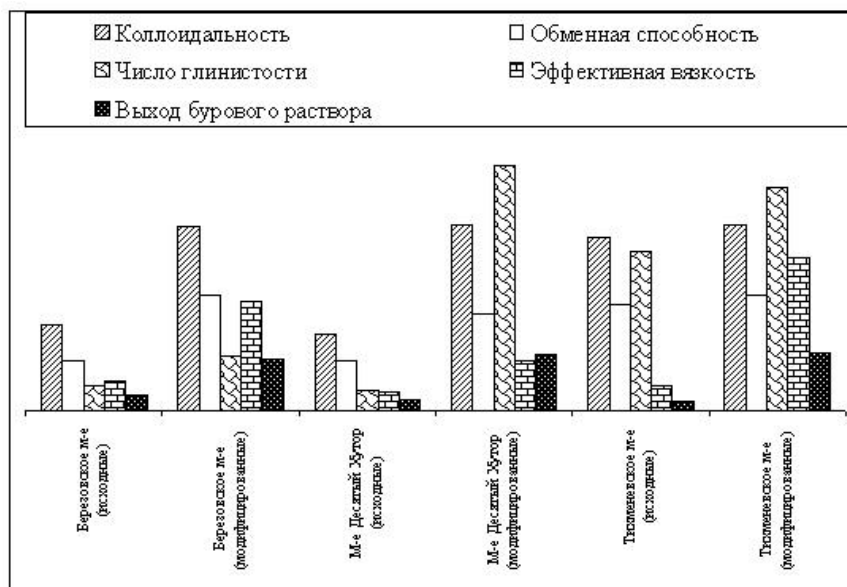


Рис.9. Зависимость физико-химических и реологических показателей от механохимических воздействий

Таким образом, отчетливо наблюдается влияние механоактивационных процессов на физико-химические и технологические свойства бентонитовых глин: величины обменной способности, числа глинистости, коллоидальности и эффективной вязкости возрастают. Выход бурового раствора как основной показатель качества глинопоршка для использования его в промывочных жидкостях, достиг значения более 16 м³/т у всех исследуемых объектов, что свидетельствует о высокой диспергируемости глинистого раствора, а следовательно высокоом качестве глинопоршковых, приготовленных способом механохимической активации.

Работа выполнена по государственному контракту по ПФО, тема №136 и в рамках договора №312 с Сахалинской ГРЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грим Р.Э. Минералогия и практическое использование глин. М.: Мир, 1967. 512 с.
2. Эйриш М.В., Пермяков Е.Н. Кристаллохимические и структурные особенности монтмориллонита и их влияние на свойства бентонитовых глин // Сборник статей «Бентониты». М.: Наука, 1980. С. 53-58.
3. Молчанов В.И., Юсупов Т.С. Физические и химические свойства тонко-диспергированных минералов. М.: Недра, 1981. 161 с.
4. Лыгина Т.З., Сабитов А.А., Трофимова Ф.А. Бентониты и бентонитоподобные глины. Казань: ФГУП «ЦНИИгеолнеруд», 2005. С. 25-28.
5. Патент РФ №2191794. Способ получения глинопоршка для буровых растворов. Авторы: Эйриш М.В., Трофимова Ф.А., 25.07.2000.

МЕТОДИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ОБЪЕКТОВ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Ю.А. Шатнов, А.В. Турашева

Всероссийский научно-исследовательский институт синтеза минерального сырья
ВНИИСИМС, г. Александров Владимирской обл.; e-mail: geo@vniisims.ru

Геолого-экономическая и стоимостная оценки месторождений твердых полезных ископаемых с 1997 года проводится по единому стандарту, согласно укрупненным технико-экономическим показателям (ВИЭМС, 1997, 2002 г.г.) [3]. Для площадей с подсчитанными прогнозными ресурсами, при отсутствии многих требуемых качественных и затратных параметров, данная методика не всегда применима. В качестве рекомендаций по учету природных особенностей объектов при передаче в недропользование инвестиционно привлекательных участков недр предлагается методическая схема, позволяющая определить геолого-экономическую значимость проявлений кварцевого сырья на ранних стадиях ГРП.

В основу названной схемы положена разработка корректирующих показателей – коэффициентов удорожания к *исходной стоимости прогнозных объектов* (потенциальных месторождений). Изначально эта базовая стоимость зависит от *количества реальных ресурсов и качества сырья* (определяющих параметров его спроса и рыночной цены). Однако роль дополнительных характеристик (условия залегания и расположения объектов, технология добычи, обогащения и др.) чрезвычайно важна, поскольку во многих случаях исключает возможность рентабельной разработки или резко снижает экономическую отдачу от их эксплуатации.

Расчёт этих уточняющих коэффициентов проводился на основании имеющихся материалов по геолого-экономической оценке месторождений кварцевого сырья и некоторых других твёрдых полезных ископаемых [1,2, 4-7].

Перечень корректирующих показателей, отражаемых в соответствующих коэффициентах и исходные положения для их определения приводятся в табл. 1. Используется 7 уточняющих параметров к исходной характеристике (качеству сырья и направлению его применения). Конкретные данные по каждому параметру разделены на 4 группы – от наиболее благоприятных условий освоения объекта (группа I) к наиболее сложным (группа IV). *Расчёт корреляционных соотношений (приведенных значений)* по группам базируется на количественных параметрах, при этом в качестве исходных приняты данные по объектам, благоприятным для освоения по большинству показателей и обеспечивающим при разработке среднеотраслевой уровень рентабельности (группа II). *Расчёт относительного влияния* – «показателя влияния» (п.3 табл.1) каждого параметра на экономическую значимость проявления опирается на материалы по сопоставлению различных категорий затрат при освоении месторождений кварцевого сырья или других видов сырья (в среднем 2-4 конкретных расчёта для каждого параметра).

Таблица 1

Перечень корректирующих параметров оценки и исходные положения для их определения

№ пп	Параметры оценки	Показатель влияния параметра	Группы благоприятности по учитываемому параметру			
			I	II	III	IV
1	2	3	4	5	6	7
1	<i>Масштабы минерализации:</i>	0,2	уникальные	крупные	средние	мелкие
	– обеспеченность запасами		>50 лет	25 лет	до 10 лет	1-2 года
	– приведенные значения параметра		2	[1.0]	0,4	0,04
	– то же с учетом показателя влияния		0,4	0,2	0,08	0,008
2	<i>Категория прогнозных ресурсов и запасов</i>	0,3	запасы	ресурсы P ₁	ресурсы P ₂	ресурсы P ₃
	– переводные коэффициенты из ресурсов в запасы		1,0	0,8	0,32	0,032
	– приведенные значения параметра		1,25	[1.0]	0,4	0,04
	– то же с учетом показателя влияния		0,4	0,3	0,12	0,01
3	<i>Географо-экономические условия районов</i>	0,4	обжитые с развитой инфра-структурой	обжитые с ограниченной инфра-структурой	географически сложные с доступной инфра-структурой	географически сложные удаленные
	– минимально необходимая цена для освоения		0,9 дол/кг	1,15	1,35 дол/кг	2,3 дол/кг
	– приведенные значения параметра		1,25	[1.0]	0,8	0,42
	– то же с учетом показателя влияния		0,5	0,4	0,3	0,16
4	<i>Горнотехнические условия объектов</i>	0,25	удобные для открытой отработки в зоне ГОКа	то же, но с удаленным ГОК или на больших глубинах	штольной отработки	шахтной или сложной штольной отработки
	уд. затраты на разработку, дол/кг		0,92	1,2	1,5	3
	– приведенные значения параметра		1,6	[1.0]	0,8	0,4
	– то же с учетом показателя влияния		0,4	0,25	0,2	0,1
5	<i>Интенсивность минерализации</i>	0,2	высокая	средняя	низкая	убогая
	выход промпродукта		>20%	10-20%	5-10%	до 5%
	– приведенные значения параметра		1,75	[1.0]	0,6	0,38
	– то же с учетом показателя влияния		0,35	0,2	0,12	0,08
6	<i>Методы переработки</i>	0,2	механические	физические с сухой сепарацией	физико-химические с мокрой сепарацией	спец. методы
	– сравнительные затраты (1992г. Ороногодское м-ие), руб/т		382	865	1100	2200
	– приведенные значения параметра		2,0	[1.0]	0,5	0,24
	– то же с учетом показателя влияния		0,4	0,2	0,1	0,05
7	<i>Уровень разведанности</i>	0,15	проведена разведка	проведены поисково-оценочные работы	проведены поиски	проведены прогнозно-поисковые работы
	– сравнительные затраты (м-ие Желанное), руб/т		8103	5658	3418	1613
	– приведенные значения параметра		1,8	[1.0]	0,6	0,16
	– то же с учетом показателя влияния		0,3	0,15	0,09	0,02
Интегральная оценка корректирующих показателей			2,75	1,7	1,01	0,43

С учетом значений обоих показателей для каждого объекта рассчитывается интегральная оценка его относительной геолого-экономической значимости (по отношению к базовой стоимости). Для объектов I группы, весьма благоприятных для освоения, сумма корректирующих показателей принимается равной **2,75-2,25** ед.; для II группы, благоприятной для освоения – **2,25-1,50** ед.; для III группы, среднего уровня благоприятности – **1,50-0,75**; для IV группы, мало благоприятных для освоения – **<0,75** ед. В качестве примера приведен расчет интегрального показателя благоприятности освоения прогнозных ресурсов по Желаннинскому узлу (табл. 2).

Таблица 2

Расчёт интегрального показателя благоприятности освоения прогнозных ресурсов прозрачного кварца по Желаннинскому узлу

№№ пп	Определяющие параметры	Группа благоприятности	Показатель благоприятности
1	Масштабы минерализации	I	0,4
2	Категория запасов-ресурсов	I	0,4
3	Уровень разведанности	I	0,3
4	Интенсивность минерализации (выход концентрата)	I	0,35
5	Технология переработки сырья	I	0,4
6	Географо-экономические условия	III	0,3
7	Горнотехнические условия	III	0,2
Интегральная оценка благоприятности			2,35
Группа объектов по уровню благоприятности освоения			I

Разработанные интегральные показатели благоприятности освоения рекомендуется к применению при расчётах стартовой стоимости лицензируемых прогнозных объектов для определения первоначального взноса (бонуса). Реально предлагается увеличение этого взноса для проявлений I группы благоприятности. Для площадей с ухудшенными параметрами минерализации и условий размещения (группы III и IV) предлагается введение льготных экономических подходов. В том числе, для объектов с крайне неблагоприятными условиями освоения предлагается полное освобождение от первоначальных взносов за приобретение потенциального месторождения (бонуса). Возможны, видимо, и другие льготы для освоения объектов двух последних групп – освобождение от налогов на начальный период, снижение их в последующие годы освоения и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев В.С. Геолого-экономическая оценка месторождений твердых полезных ископаемых на ранних стадиях геологоразведочных работ. Москва. Изд-во «Недра». 1989. – 89с..
2. Гатов Т.А. Экономическая оценка месторождений цветных металлов. М: Издательство «Недра», 1975. – С. 229-241
3. Методика геолого-экономической переоценки запасов месторождений твердых полезных ископаемых по укрупненным технико-экономическим показателям (кроме месторождений угля) / М.Н. Денисов, В.П. Василенко, В.А. Алискеров, Н.И. Поздняков. М: ВИЭМС, 2002. – 30 с.
4. Методические рекомендации по анализу и оценке экономической эффективности геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые. ВИЭМС.Москва. 1979. – 53 с.
5. Методические рекомендации по разработке технико-экономических докладов и целесообразности детальной разведки месторождений твердых полезных ископаемых. ВИЭМС.Москва.1986. – С.10-86
6. Погребницкий Е.О., Терновой В.И. Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. Ленинград: Издательство «Недра», 1974. – С. 7-15,129-174.
7. Русанов Д.К. Экономическая оценка минеральных ресурсов. М: Изд. «Недра», 1987. – С.17-34, 51-62.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Милеева И.М

ЦНИГРИ, г. Москва, bdt-aleks @ mail.ru

Технологические показатели сырья – совокупность признаков, характеризующих эффективность его обогащения: дробимость, раскрываемость минеральных ассоциаций, степень разделения на полезные и сопутствующие компоненты [1]*. Существует большое количество природных разновидностей кварцевого сырья, каждая из которых является отдельным технологическим типом (горный хрусталь, пьезооптический кварц, кварциты, кварцевые пески и др). Требования к природному сырью предъявлялись до настоящего времени

* Поскольку кварцевое сырье – практически мономинеральный агрегат, целью его обогащения является не разделение компонентов, а очистка кварца от примесей

только для пьезооптического кварца (отсутствие трещин, свилей, включений и двойников). Строгих качественных ограничений к остальному природному сырью нет, существующие ТУ определяют свойства предварительно обогащенного концентрата (кварцевой крупки) и различаются соответственно назначению кварца. Наиболее жесткие требования предъявляются крупке, используемой для плавки прозрачного кварцевого стекла (ТУ-5726-002-11496665-97). Здесь лимитируются содержания элементов-примесей, коэффициент светопропускания, количество высокотемпературной воды, содержания минеральных примесей. Не учтены, однако, два важных показателя – содержание структурных примесей и состав остаточной флюидной фазы, влияющие на качество стекла.

Федеральные программы развития электронной промышленности, дальнейшее развитие волоконно-оптических линий связи, ужесточение требований к качеству изделий из специальных кварцевых стекол ставят задачу обеспечения промышленности

высококачественными кварцевыми концентратами (особо чистым кварцем – ОЧК) [2]. Это привело к необходимости оперативной переоценки ресурсов и запасов природного кварцевого сырья, пригодного для получения ОЧК. Однако типизация природного кварца по свойствам, определяющим качество концентрата, в настоящее время не разработана.

Объекты изучения. Нами изучены свойства кварцевого сырья двух природных типов: а) гранулированного жильного кварца (достаточно традиционное сырье для плавочного кварца) – Уфалейский кварценосный район Среднего Урала, месторождения Кыштымское и Кузнечихинское; б) кварциты (нетрадиционное кварцевое сырье) – Восточный Саян, месторождение Бурал-Сардык.

Месторождения гранулированного кварца Уфалейского кварценосного района приурочены к породам гнейсо-амфиболитового комплекса [3], представляющего собой мегамеланж, связанный с долгоживущими тектоническими шовными зонами. В настоящее время Уфалейский комплекс представляют в качестве субдцированной плиты, имеющей двучленное строение: западная часть край фундамента Русской платформы, а в восточной – вскрыт глубинный срез интенсивно меланжированной субдукционной зоны с метаморфизмом повышенных давлений [4]. Высокобарический комплекс обладает зональным строением. Восточная часть рассматривается как эклогит-сланцевая, западная – как эклогит-сланцево-мигматитовая.

Породы района слагают тектонические пластины: егустинскую (допалеозойские амфиболиты и палиогнейсы), слюдяногорскую (развитые по допалеозойским породам биотит-амфиболитовые бластомилониты, габбро-амфиболиты, плагиопегматиты); куртинскую (бластомилониты дистен-силлиманитовой фациальной серии). Уфалейский кварценосный район с востока ограничен Главным Уральским глубинным разломом, с запада – Серебрянским разломом. В районе выделены два типа гранулированного кварца, перспективные для получения ОЧК: уфалейский (тонко-среднезернистый, неравномернозернистый, с зубчатыми границами) и кыштымский (средне-крупнозернистый равномернозернистый с ровными границами).

В Восточном Саяне (Республика Бурятия) выявлено и разведано месторождение кварцитов Бурал-Сардык. Оно располагается в тектоническом покрове, надвинутом на гранито-гнейсовый гарганский комплекс, приурочено к кремнисто-карбонатным породам иркутской свиты, слагающим одну из чешуй надвига. Вмещающие породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций. Основной промышленный интерес представляют участки метасоматической переработки осадочно-метаморфогенных кремневидных темных микрокварцитов, где формируются осветленные новообразования – «суперкварциты», отличающиеся повышенной химической чистотой [5].

Типоморфные свойства природного кварца. Наиболее важными типоморфными свойствами природного кварца, определяющими его технологические показатели, являются [6]:

1. Структурно-текстурные особенности;
2. Элементы-примеси в различных формах:
 - минеральной,
 - флюидной,
 - структурной (в кристаллической решетке кварца).

Структурно-текстурные особенности определяют степень дробимости кварца. Несмотря на то, что кварц составляет 90-98% исходного сырья, выход крупки при дроблении колеблется от 9,6 до 29,2 (Кузнечихинское месторождение) и 32,9 (Кыштымское месторождение). Причины малого выхода полезного компонента в настоящее время изучены недостаточно. По предварительным представлениям, агрегаты, в которых размеры зерен сопоставимы с размерами частиц получаемого концентрата ($0,5 \pm 0,1$ мм), характеризуются лучшей дробимостью. Равномернозернистые агрегаты с ровными границами зерен определяют меньшие потери при обогащении, чем неравномернозернистые. Дефектность структуры (наблюдаемые в зернах субструктуры) [7, 8] понижает предел упругости прочности измельченных частиц, что влечет за собой переизмельчение кварца и увеличение потерь при дроблении. Кроме того, дробимость кварца зависит от его текстурных особенностей (катаклазированнойности, разлистованности, трещиноватости) [7].

Пробы гранулированного кварца Кыштымского и Кузнечихинского месторождений представлены следующими разновидностями:

– кварц кыштымского типа: равномернозернистый, величина зерен от 1-2мм, границы ровные, изредка – ступенчатые (рис. 1);
– кварц уфалейского типа: неравномернозернистый, величина зерен 0,3-1,0мм, границы ступенчатые, реже зубчатые. Более крупные зерна встречаются реже, чем мелкие (рис. 2);
– кварц неравномернозернистый, зерна размером 0,1-4,0мм с извилистыми, зубчатыми, иногда – фьордовыми границами (рис. 3).

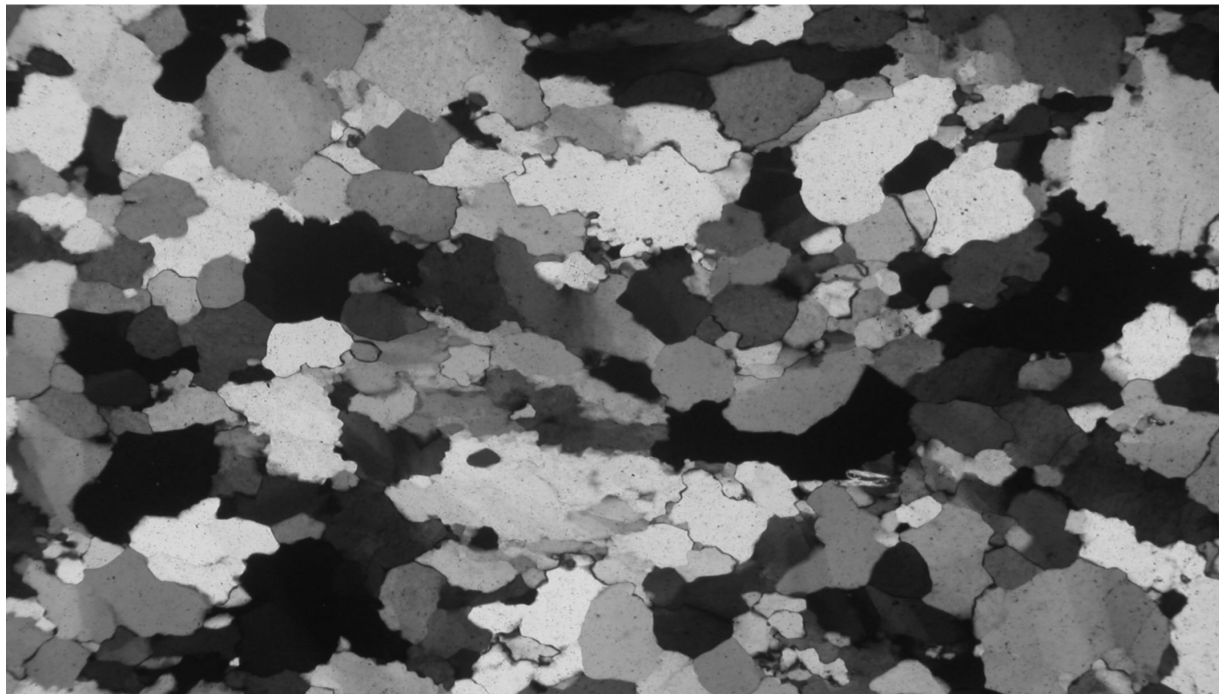


Рис. 1. Гранулированный кварц «уфалейского» типа. Кузнечихинское месторождение ж – 191; х2, николи +.

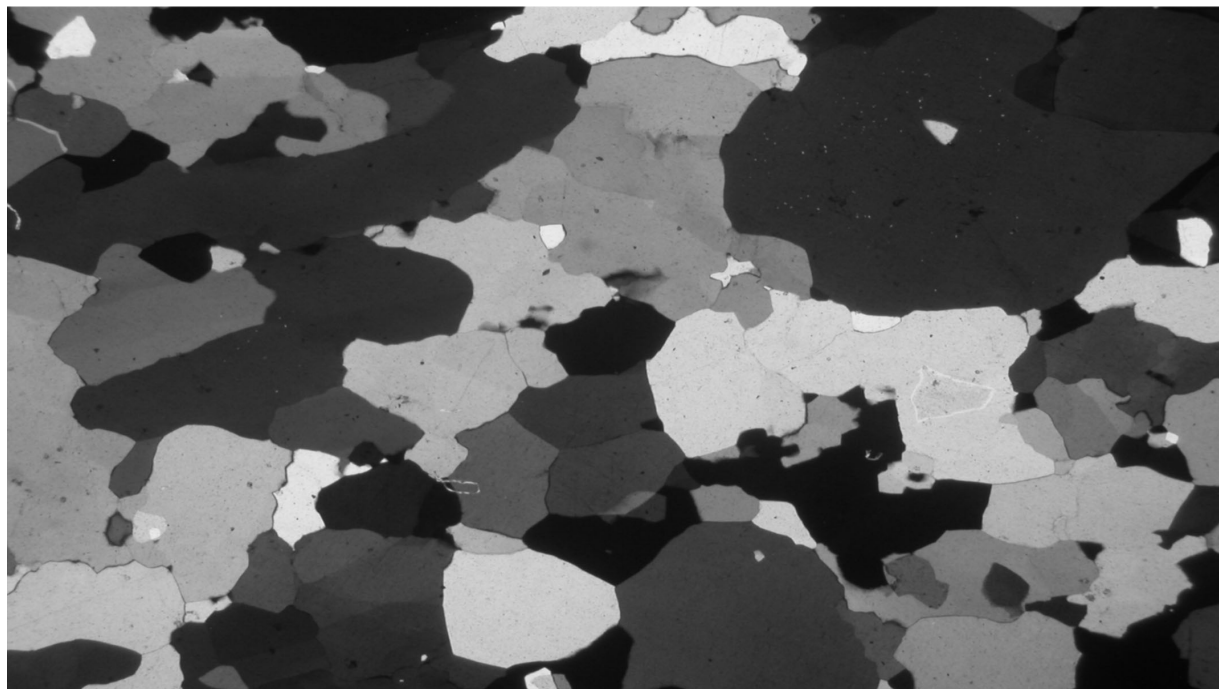


Рис. 2 Гранулированный кварц «кыштымского» типа. Кыштымское месторождение ж-175; х2, николи +

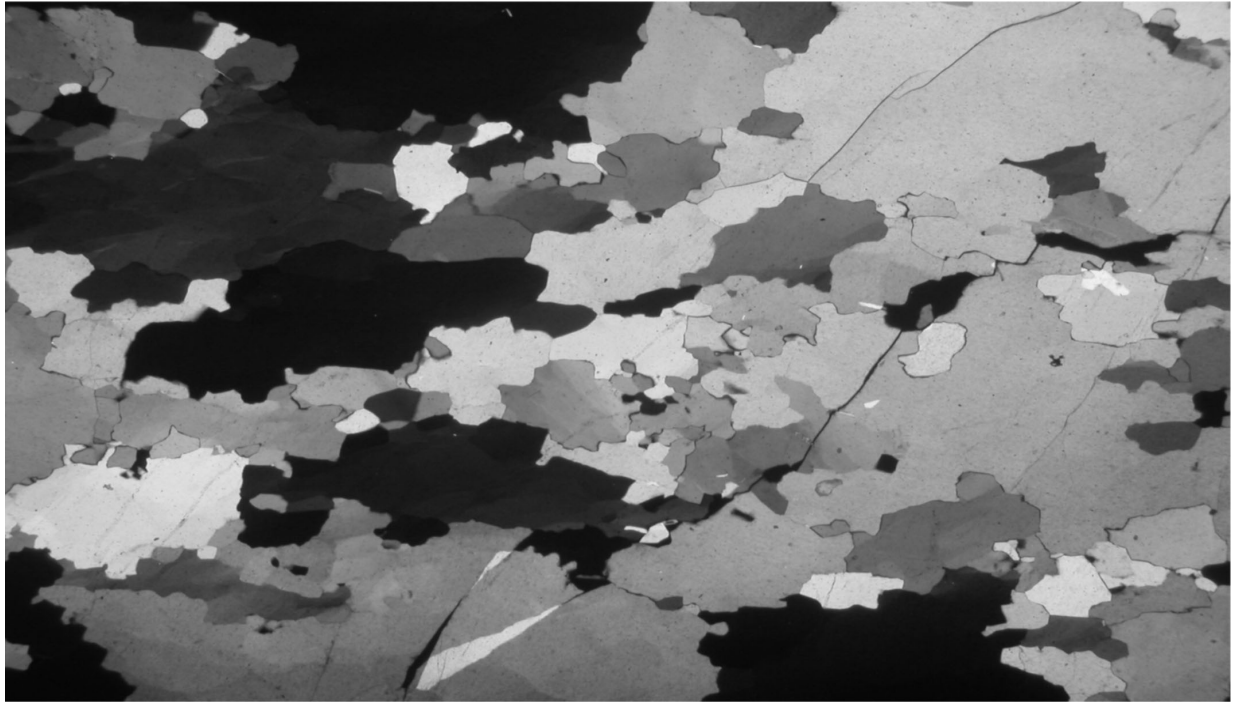


Рис. 3 Гранулированный неравнозернистый кварц. Кузнецихинское месторождение ж-413; х2, николи +

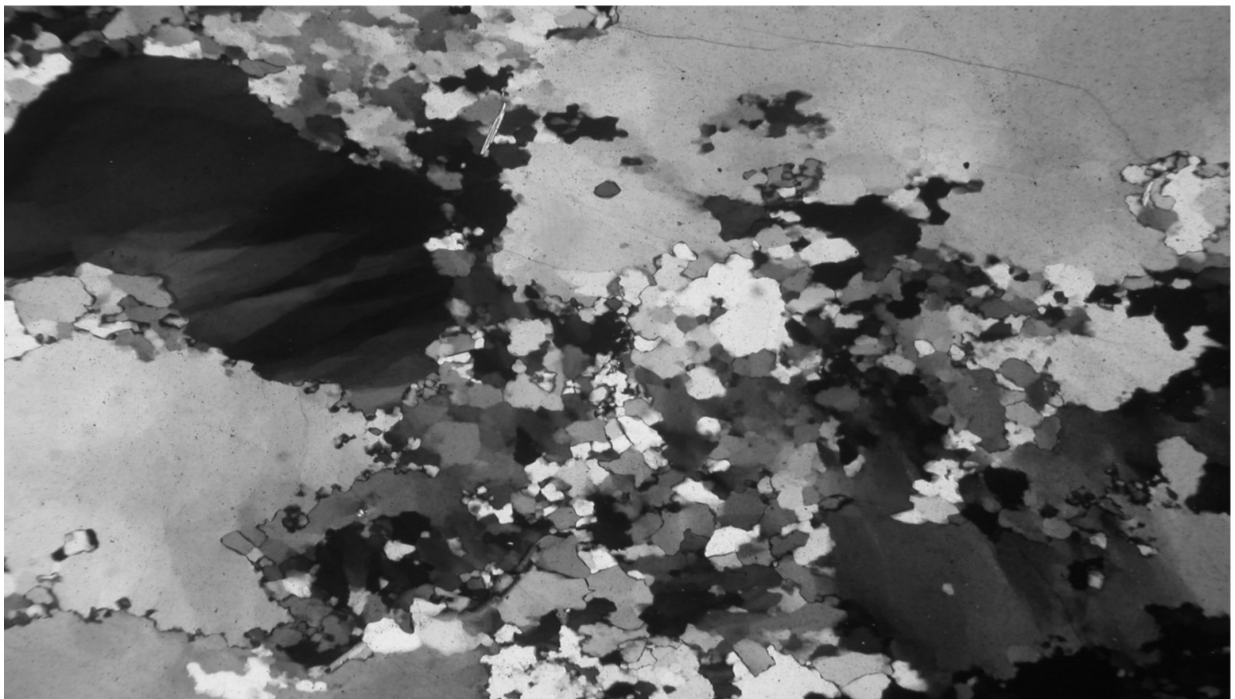


Рис. 4 Суперкварцит. Месторождение Бурал-Сардык; х2, николи +

Кварциты Восточного Саяна (суперкварциты) – породы неравнозернистой структуры. Основная масса породы представлена агрегатом кварцевых зерен размером 0,1-0,4мм, с включениями зерен размером 1,5-2,0 х 3-4 мм обычно линзовидными, субпараллельно расположенными. Количество их от 5 – до 50% породы. Границы зерен ступенчатые, зубчатые, извилистые (рис. 4).

Минеральные примеси ограничивают светопропускание кварцевого стекла, понижает его однородность и прозрачность. Окрашенные участки в стеклах создают:

- окислы и гидроокислы железа, сульфиды тяжелых металлов (коричневые);
- рутил и другие титановые минералы (темно-зеленые);

– кальций и магний содержащие минералы (флюорит, кальцит, доломит, апатит, тальк – белесые участки «седого» стекла).

Бесцветные включения с дефектом двупреломления и рябь создают алюмосиликаты (слюды, полевые шпаты), а также эпидот, цоизит, гранат [9].

Современные технологии обогащения кварцевого сырья (термодробление, применение высокоинтенсивных и высокоградиентных магнитных сепараторов, современные методы флотации, высокотемпературного хлорирования и др.) позволяют освободиться практически от всех минеральных примесей [10, 11]. Не полностью удаляются только микроскопические иголки рутила. Рутит имеет более высокую температуру плавления, чем кварц. Это приводит к образованию пузырьков при перегреве расплава.

Изученный нами гранулированный кварц разных жил Кыштымского и Кузнечихинского месторождений (табл. 1) довольно сильно различается по составу минеральных примесей. Для Кыштымского месторождения характерен более сложный и разнообразный состав примесей, количество их большее, чем в кварце Кузнечихинского месторождения. Распространены карбонаты, сульфиды; рутит (крупные зерна) установлен только в жиле 175. Кварц Кузнечихинского месторождения более чистый, минеральные примеси в основном представлены слюдами, амфиболом, эпидотом. В единичном случае отмечен рутит.

Суперкварциты месторождения Бурал-Сардык бедны минеральными примесями, в них установлены единичные включения серицита, карбоната, гематита.

Газово-жидкие (флюидные) включения играют большую роль при технологическом переделе кварцевого сырья. Часть из них удаляется при термодроблении, наиболее мелкие могут сохраняться и после него. Как отражение количества газово-жидких включений в действующих ТУ приняты показатель светопропускания и содержание высокотемпературной воды. Однако показатель светопропускания зависит не только от количества включений, но и от трещиноватости, поэтому для более точного определения ГЖВ в исходном сырье нужны дополнительные характеристики. Рекомендуется оценивать декрептоактивность кварца, которая характеризует общее количество ГЖВ и их способность растрескиваться при термодроблении. Почти полное отсутствие пиков на декрептограммах кварца из жил 414, 175 и суперкварцитов БС-47 (рис. 5) характеризует малое содержание ГЖВ в кварце этих объектов.

Таблица 1

Минеральные примеси в различных типах кварцевого сырья

Месторождение	жила	Тип кварца	Кол-во примесей (%)	Состав примесей
Кыштымское	56	гранулированный кварц	1	Слюды, гидроокислы железа, полевой шпат, пирит, карбонат, актинолит
	175		3	Амфибол, слюды, сфен, рутит, апатит, сульфиды, карбонат, гидроокислы железа, полевой шпат
	314		2,3	Карбонат, гидроокислы железа, пирит
Кузнечихинское	191		0,5	Слюды, эпидот, лимонит
	192		0,9	Слюды, лимонит
	193		0,2	Слюды, полевой шпат, амфибол, рутит, везувиян, гидроокислы железа
	194		0,5	Слюды, амфибол, эпидот, карбонат, полевой шпат, гидроокислы железа
	195		0,1	Мусковит, полевой шпат, эпидот
	264-267		0,3	Слюды, амфибол, эпидот, полевой шпат, гранат
	280-284		0,4	Слюды, полевой шпат, эпидот, лимонит
	255		1	Полевой шпат, слюды, гидроокислы железа
	414		0,1	Слюды, лимонит, амфибол
Бурал-Сардык		суперкварциты	Ед.включения	Серицит, гематит, карбонат

Не менее важными характеристиками являются размеры и распределение включений, т.к. мелкие включения не растрескиваются, а переходят в стекло, ухудшая его качество при плавке. Для более точной оценки этих параметров Л.А.Данилевской [8] предложена методика анализа включений в шлифах и тонких пластинках с использованием измерительной сетки (объектив 60х, окуляры 6х). Этот простой и малозатратный метод позволяет выделить включения, удаляемые при термодроблении (0,01-0,03мм), отжиге до 1400-1550° (0,005-0,01мм) и практически не удаляемые (<0,005мм), оценить их количество и отбраковать трудно-обогащаемое сырье.

Состав остаточной флюидной фазы в кварце также играет большую роль при получении стекла. Во-первых, в ней могут содержаться элементы-примеси (Na, K, Ca). Во-вторых, включения содержат H₂O, CO₂, СО и углеводороды. Выделение части воды и СО₂ происходит при низких температурах. При высоких температурах выделяется оставшаяся высокотемпературная вода и СО. Сырье с большим содержанием этих примесей не обеспечивает получения в роторных электропечах стекол с низким содержанием пузырьков [12]. При оценке концентрата состав флюидов в нем детально определяется масс-спектрометрическим методом [12]. На ранних стадиях геологоразведочных работ оценить количество воды и основных газов можно хроматографическим методом с нагреванием до 600° С.

На рис. 6 показаны результаты хроматографического анализа, проведенного Салазкиным А.Н. (ГЕОХИ РАН). Гранулированный кварц довольно четко подразделяется на две группы:

- в кварце уфалейского типа при относительно низком содержании воды и CO_2 почти всегда присутствует СО (на Кузнечихинском месторождении – больше, на Кыштымском – меньше);
- в кварце кыштымского типа содержание воды и CO_2 больше, СО практически отсутствует;
- в суперкварцитах месторождения Бурал-Сардык при небольшом содержании воды количества CO_2 и СО близкие. Содержания СО по сравнению с гранулированным кварцем Урала повышены. Следует обратить внимание и на то, что сумма углеводородов также существенно больше, чем в гранулированном кварце.

Структурные примеси являются основным препятствием к использованию кварцевого сырья, т.к. при обогащении они не удаляются [8, 10]. Для их изучения широко пользуются весьма информативными методами: ЭПР, ИКС [13].

Однако при изучении дефектности кварца с их помощью возникает ряд методических трудностей, увеличивающих время выполнения и стоимость анализов. Для качественной оценки структурных примесей могут быть использованы экспрессные и малозатратные термо- и рентгенолюминесцентные методы, качество которых согласуется с ЭПР [14]. Изучение люминесцентных свойств гранулированного кварца Кыштымского и Кузнечихинского месторождений, а также кварцитов месторождения Бурал-Сардык [15] позволило разделить изученное сырье на группы (табл. 2)

I – практически не содержащее структурных примесей;

II-III – содержание небольшого количества структурных примесей;

IV – с большим содержанием структурных примесей;

в I и II группу входят, в основном, пробы кварца уфалейского типа, в III и IV – кыштымского; кварциты встречаются во всех группах.

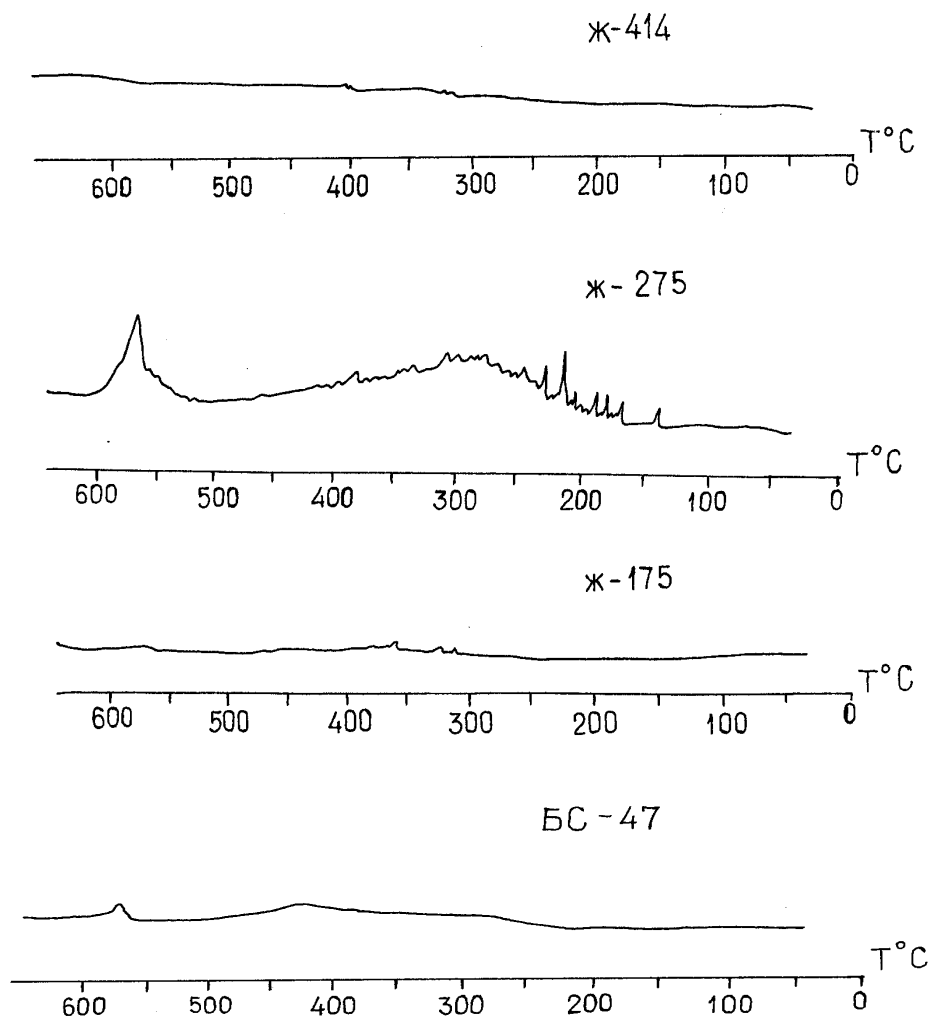


Рис. 5 Декрептограммы гранулированного кварца Уфалейского кварценосного района (ж-414, ж-175 – кварц уфалейского типа, ж-275 – кыштымского типа и суперкварциты Восточного Саяна (БС-47))

Таблица 2

Характеристика спектров люминесцентного излучения различных типов кварцевого сырья

Тип спектра	Характеристика спектра	Месторождение № жил	ТЛ (t°C)			РЛ (λ, нм)		
			100-120	130-150	200	РЛ ₁ 480-570	РЛ ₂ 360-380	РЛ ₂ (370) РЛ ₂ (500)
I	Основную роль играют собственные дефекты (излучение на λ 450-460 Нм, 620, 680-700 Нм) После прогрева до 400°C появляется РЛ 360-380 нм при одновременном частичном разрушении полосы на λ 450-460 Нм. На кривой ТЛ макс. 100-110°C	Кузнечихинское: ж-192, ж- 193, ж-195; Кыштымское: ж- 179 Бурал-Сардык (БС): 47 Кузнечихинское:ж- 414	15 27 124 23			18 20 28 17	150 130 225 200	8,3 6,5 8 11,8
				1 3		15 20	114 225	7,6 11,2
II	Тип переходный между I и III типами	Кузнечихинское ж-413 ж-191 Кыштымское ж-170	24 6	8 50		35 25 27	140 100 150	4 4 5,5
III	Присутствуют собственные дефекты, но наиболее интенсивно проявлены примесные центры AlO ₄ ⁴⁻ /Li ⁺ . Максимум излучения на λ=470-520 Нм. После прогрева до 400°C полоса РЛ частично разрушается. На кривой ТЛ макс. 130-150°C.	Кыштымское ж-314 ж-175 Бурал-Сардык Бс-2	55 1	166 82 1		100 110 15	120 165 15	1,2 1,5 1
IV	В типе снижена роль собственных дефектов, что проявляется в более слабой интенсивности излучения в полосе с λ=370 Нм в спектрах РЛ 2. Повышенная роль AlO ₄ ⁴⁻ центров с компенсаторами особенно интенсивно проявляется при повторных облучениях т.е. при увеличении времени рентгенизации, интенсивность РЛ 480-520 Нм при этом возрастает в 2-3 раза, в то время как РЛ на λ=370 Нм сильно падает.	Кыштымское ж-3 Бурал-Сардык Бс-1	1	65 1	2	52 18	25 9	0,5 0,5

Примечание: ТЛ- термолюминесценция после облучения рентгеном; РЛ₁- рентгенолюминесценция исходных образцов, РЛ₂ – рентгенолюминесценция образцов, прокаленных до 400° РЛ₂(370)/РЛ₁(500) – характеризует отношение собственных дефектов матрицы SiO₂ к дефектам, обусловленным наличием в структурной решетке центров AlO₄⁴⁻, компенсированных Li⁺ (возможно и Na⁺, Cu⁺, Ag⁺, H⁺)

Основные выводы. Исходя из характеристик, полученных при изучении различных типов кварцевого сырья, можно разделить их по степени перспективности для получения высококачественного концентрата. Наиболее перспективным представляется гранулированный кварц уфалейского типа. В нем содержится меньшее количество структурных примесей и газовой-жидких включений. Размеры зерен гранулированного кварца, соизмеримые с размерами крупки, и довольно простые границы зерен позволяют ожидать достаточный выход крупки после обогащения. Вторым по перспективности, вероятно, следует считать суперквациы месторождения Бурал-Сардык (типа БС-47) с небольшим содержанием структурных и минеральных примесей, газовой-жидких включений. Понижает качество сырья повышенное СО и углеводородов в составе остаточной флюидной фазы и неравномернозернистая структура кварцитов.

Гранулированный кварц Кыштымского типа, несмотря на ожидаемые малые потери при дроблении, характеризуется большим содержанием структурных примесей и газовой-жидких включений.

Таким образом, предварительная оценка природного кварцевого сырья на ранних стадиях геологоразведочных работ может быть проведена с помощью комплекса малозатратных экспресс-методов. Комплекс включает петрографический, минералогический, хроматографический термо- и рентгенолюминесцентные методы и позволяет отбраковать труднообогащаемое сырье, избегая неоправданных затрат на обработку технологических проб и опытные плавки заведомо непригодного сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт Российского геологического общества. Твердые полезные ископаемые и горные породы. Геологическое картографирование. СТО РосГео 09-007-98 М. 1998, 41 с.
2. Серых Н.М., Федотов В.К. Достижения и проблемы кварцевой подотрасли в преддверии 300-летия геологической службы России.// Разведка и охрана недр. 1999, №3, с. 2-3
3. Савичев А.Н. Уфалейский кварцево-жильный район (закономерности размещения кварца различных генетических типов, минералого-технологическое картирование и прогноз). Автореферат кандидатской дисс. Екатеринбург, 2005, 24 с.

4. *Белковский А.И.* Кыштымское месторождение прозрачного жильного кварца: геодинамическая, «возрастная» позиция и генезис кварцевых жил (Средний Урал). // Матер. межд. семинара «Кварц, кремнезем». Сыктывкар, 2004, с. 189-191.
5. *Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И.* Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия). Доклад РАН 2003, т.390 №2, с. 219-223.
6. Минералургия жильного кварца. Ред. Кузьмин В.Г., М. Недра, 1990, 255 с.
7. *Кораго А.А., Козлов А.В.* Текстуры и структуры жильного кварца хрусталеносных областей. Л.Недра, 1988, 159 с.
8. *Данилевская Л.А.* Геология, минералогия проявлений кварцевого сырья и критерии прогноза его качества на территории Карельского кратона. Кандидатская дисс., КНЦ РАН, Петрозаводск, 2003, 188 с.
9. Методические рекомендации по оценке качества кварцевого сырья для плавки и оптического стекловарения. М. 1983, 69 с.
10. *Jung L.* High puritg quartz. Quartz Technology Inc. New jersey, 1992, 550 с.
11. *Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В.* Кварцевое сырье Карелии. Петрозаводск, 2004, 220с.
12. *Крейсберг В.А.* Некоторые особенности вскрытия и анализа газово-жидких примесей в кварце. Разведка и охрана недр. 1999, №3. С. 21.
13. Природный кварц и его физико-химические свойства. М. Недра, 1985, 124 с.
14. *Вотьяков С.Л., Крохалев В.Я., Пуртов В.К., Краснобаев А.А.* Люминесцентный анализ структурного несовершенства кварца. Екатеринбург, 1993, 69 с.
15. *Борозновская Н.Н., Быдтаева Н.Г.* Люминесценция как индикатор микродефектности при оценке качества кварцевого сырья.// Рудные месторождения. Минералогия. Геохимия. Томск, 2003, вып. 3, с. 12-27.

СТРУКТУРНЫЕ ПРИМЕСИ В КВАРЦЕ КАК ВАЖНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ И ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Данилевская Л.А.¹ Раков Л.Т.²

¹Институт геологии КарНЦ РАН,
²ВИМС

Основными показателями качества кварцевых концентратов являются содержание элементов-примесей в кварце и газонасыщенность. При этом элементы-примеси могут входить в кварц в виде минеральных, флюидных и структурных примесей. В последнее время в связи с переходом промышленности на новые технологии наплава кварцевых стекол и ужесточением требований к качеству конечной продукции резко повысились требования к кварцевым концентратам по общему содержанию элементов-примесей. Так для наплава кварцевых труб в печах ПНД содержание Al<25 ppm, Ti<0,8 ppm, Fe<0,8 ppm, сумма щелочей <6,0 ppm, для производства формоустойчивых реакторов для эпитакиальных процессов содержание Al<25 ppm, Ti<1,2 ppm, Fe<0,8 ppm, сумма щелочей <6,0 ppm, для производства кварцевых тиглей для выращивания монокристаллического кремния содержание Al<10 ppm, Ti<1,0 ppm, Fe<0,3 ppm, Cu<0,5 ppm, Na-1 ppm, K-1 ppm, Li-0,5 ppm [12].

В свою очередь развитие современных технологий обогащения кварцевого сырья позволяет говорить о возможности практически полного удаления минеральных примесей в кварце, за исключением субмикроскопических минеральных примесей, например, волосовидных включений рутила. Примером этому является ЮТА-кварц (мировой стандарт высокочистого кварца), который производится из плагио-пегматито-гнейсов в результате технологической обработки сырья с применением высокоинтенсивной магнитной сепарации, флотации, высокотемпературного хлорирования [1].

Структурные примеси в кварце при современных технологиях переработки являются практически неудаляемыми, поэтому их концентрация фактически определяет предел обогатимости кварцевого сырья. Именно поэтому изучение структурных примесей в кварце является одной из важнейших задач при изучении обогатимости кварцевого сырья на стадиях поисково-оценочных работ.

Несмотря на то, что кварц является устойчивым минералом к изоморфизму и характеризуется стабильной структурой, в его решетку входят структурные примеси, *концентрации* которых могут значительно варьировать. Количество структурных примесей в кварце зависит от его генезиса и определяется в основном термодинамическими условиями образования, химизмом растворов, скоростью роста [4, 5, 7, 13 и др.].

При изучении структурных примесей в кварце наиболее эффективным является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), позволяющий характеризовать закономерности распределения и состав парамагнитных дефектов в кварце. Существует несколько классов структурных дефектов, обусловленных причинами их вызывающими [8]:

1) генетические дефекты – возникают в процессе минералообразования за счет внедрения изоморфных ионов или возникновения нарушений кристаллической структуры типа вакансий и междоузельных атомов Si и O. Наиболее типичные изоморфные примеси – Al, Ti, Ge, с которыми связано образование различных парамагнитных центров в зависимости от иона-компенсатора. К данному классу также относятся центр O₂³⁻, кото-

рый возникает в кремнекислородных тетраэдрах с вакансией Si, и Т-центры, локализующиеся в кластерах высокотемпературной β -фазы кварца;

2) радиационные дефекты – образуются в кварце под воздействием естественного радиационного облучения. Это, прежде всего парамагнитные дефекты типа Е-центров, представляющие собой кислородные вакансии, захватившие электроны, а также ряд других дефектов, имеющие более сложное строение;

3) диффузионные дефекты – образуются в результате диффузионного взаимодействия дефектов в минерале в природных условиях под воздействием естественной радиации, температурного прогрева и других факторов (центры Ge(III), E_5 , E_6);

4) дефекты разрушения – возникают в областях высокой дефектности кварца, связанной с процессами аморфизации, наличием межзерновых границ, скоплением дислокаций или междоузельных атомов и т.д. Этот класс охватывает большое количество дефектов, многие из которых могут являться сложными комплексами. В состав последних могут входить атомы примесей, которые несовместимы с кристаллической решеткой кварца из-за своей валентности или размеров. Поэтому дефекты разрушения можно рассматривать как своего рода «матрицу» для локализации в кварце рассеянной примеси различных элементов.

На вхождение элементов-примесей в решетку кварца существенное влияние оказывают физико-химические условия образования кварцосодержащих пород (температура, давление, состав вмещающих пород, химизм растворов). Поэтому для прогнозирования получения высокочистых кварцевых концентратов из кварцевого сырья важным моментом является понимание связи процессов изоморфизма с геологическими условиями формирования кварцевых образований. Для выявления этих закономерностей и определения перспектив кварцевого сырья Карелии методом ЭПР в ВИМСе было проведено изучение структурных примесей в различных генетических типах кварца Карелии: пегматитовом, жильном, сливных кварцитах и кварцевых метасоматитах.

Результаты исследований структурных примесей (концентрации парамагнитных центров), а также суммарные содержания элементов-примесей в кварце, содержания Al, Ti и Li приведены в обобщенной таблице.

Кварц выбранных для исследования генетических типов формировался в различных геолого-фациальных комплексах на территории Карелии.

Слюдоносно-редкометалльные пегматиты месторождения Пиртима и перекристаллизованный, гранулированный жильный кварц участков Рухнаволоок, Хизоваара локализованы в пределах Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса, который является зоной сочленения Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса и характеризуется проявлениями полихронного метаморфизма амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций кианит-силлиманитового типа (повышенных давлений).

Блоковый и ядерный кварц месторождения Пиртима варьирует по цвету, степени прозрачности и характеризуется незначительными деформационными преобразованиями в виде блокования (рис. 1а,б). Газово-жидкие включения распределены в основном по залеченным трещинам и представлены существенно-газовыми включениями с высоким содержанием газовой фазы (рис. 1в). Кварц характеризуется невысоким суммарным содержанием элементов-примесей, при этом характерно повышенное содержание Ti (табл.). Практически половину составляет структурный Ti, в качестве компенсатора основную роль играют Li и Na. Остальная часть примеси Ti связана с присутствием в зернах кварца микроскопических волосовидных включений рутила. Li в кварце, по всей видимости, является структурной примесью. Основная масса примеси Al также связана со структурными примесями. Таким образом, несмотря на довольно низкое содержание элементов-примесей в предварительно обогащенном кварце данного месторождения можно прогнозировать, что кварцевые концентраты после операций глубокого обогащения не будут соответствовать требованиям к особо чистому кварцу. Это связано как с присутствием большого количества структурных примесей, так и с мелкими волосовидными включениями рутила в кварце, которые также являются неудаляемыми при операциях технологического передела.

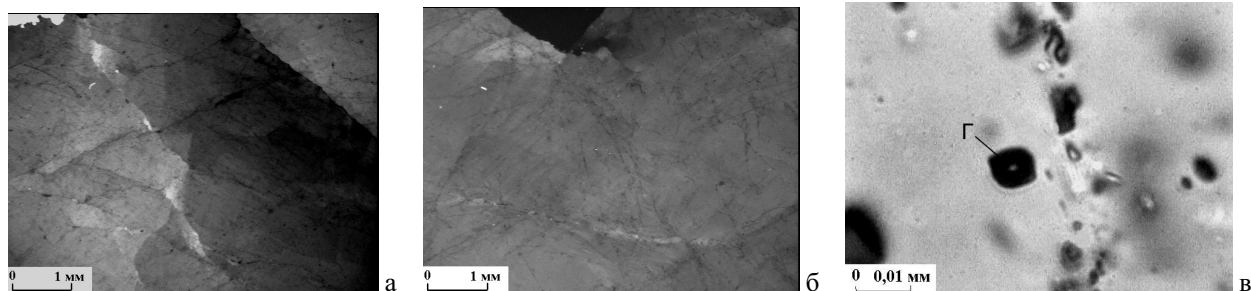


Рис. 1. Пегматитовый кварц Пиртима: а, б – пластические деформации в кварце (фото шлифов, николи+), в – газово-жидкие включения (николи||)

Формирование жильного кварца участков Рухнаволоок и Хизоваара происходило в условиях эпидот-амфиболитовой фации повышенных давлений с проявлениями перекристаллизации и грануляции кварца в результате диафореза с образованием участками гранулированного кварца с гранобластовой равновесной и неравновесной структурой (рис. 2). Характерной особенностью является малое содержание газовой-жидких включений (коэффициент светопропускания в среднем 70-90%), особенно в гранулированном кварце, а также низкое содержание элементов-примесей в предварительно обогащенных кварцевых концентратах. При этом содержание структурных примесей варьирует в гранулированном кварце и стекловидном, не подвергшемся грануляции кварце. Наблюдается значительное увеличение концентрации S_{Al} , S_{Ti} и *содержания лития* в кварце, претерпевшем процесс грануляции (табл.). Этот фактор противоречит общепринятому представлению о химическом очищении кварца в результате грануляции [3, 4 и др.]. Данные процессы, по всей видимости, приводят к очищению кварца от минеральных и газовой-жидких включений, что видно по результатам химических анализов кварцевых концентратов после предварительного обогащения. Что касается структурных примесей, то процесс грануляции, проходящий в условиях высоких температур и давлений, не способствует очищению кварца от структурных примесей. В результате концентрации основных элементов-примесей в кварцевых концентратах, полученных из гранулированного кварца, фактически обусловлены концентрациями парамагнитных центров, которые превышают 30 ppm. То есть получение высокочистого кварца из данного типа сырья является проблематичным. Концентрации структурных примесей в стекловидном негранулированном кварце данных участков несколько ниже, чем в гранулированном, однако данный кварц содержит включения волосовидных зерен рутила, что приводит к повышенному содержанию Ti в кварцевых концентратах.

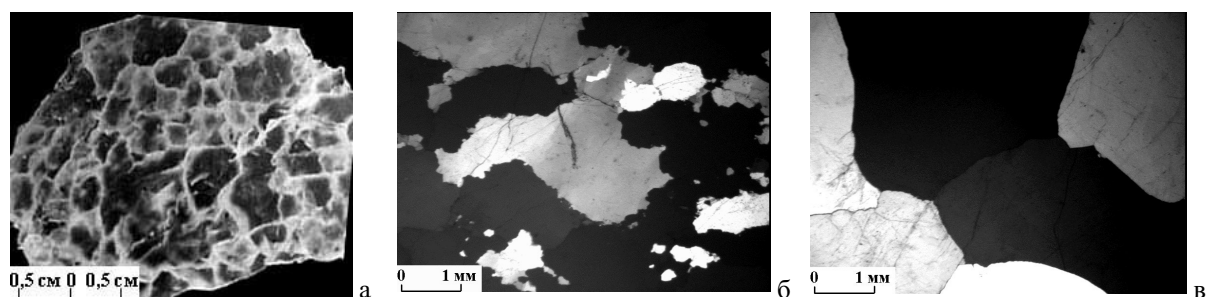


Рис. 2. Перекристаллизованный, гранулированный жильный кварц Рухнаволоок, Хизоваара:

а – грануляция кварца (Хизоваара, фото пластинки), б, в – неравновесная и равновесная гранобластовая структуры (Рухнаволоок), фото шлифов, николи+

Кварц из кварцевых жил месторождения гранатов Тербеостров (Беломорский подвижный пояс), представленного гранатовыми амфиболитами, гранат-биотитовыми, кианит-гранат-биотитовыми гнейсами, также характеризуется проявлением собирательной рекристаллизации с образованием местами гранулированного кварца. Формирование кварцевых жил в пределах данного участка связано с проявлением кислотного выщелачивания в основном кианит-кварцевой фации, которое проходило наряду с железомagneзильным метасоматозом. Проанализированный стекловидный кварц из данных жил характеризуется высокой прозрачностью (коэффициент светопропускания 91%) и высоким содержанием Ti , что обусловлено в основном присутствием волосовидных включений рутила в кварце. Концентрации структурных примесей в данном кварце аналогичны стекловидному кварцу участка Хизоваара и характеризуются довольно высоким содержанием S_{Ti} в основном с компенсатором Li . Такое содержание структурного Ti , а также присутствие неудаляемых включений рутила дает возможность прогнозировать невозможность получения высокочистых кварцевых концентратов из данного кварца.

Наиболее низкие концентрации структурных примесей, особенно S_{Ti} и S_{Li} наблюдаются в жильном молочно-белом кварце (Фенькина-Лампи, Меломайс), для которого характерны низкотемпературные деформационные изменения, сопровождающиеся процессами катаклаза, фрагментации и вторичной рекристаллизации с образованием мелкозернистого вторично рекристаллизованного кварца (рис. 3). Высокие содержания элементов-примесей в кварцевых концентратах после предварительного обогащения в основном обусловлены повышенными концентрациями Al , K , Na , Ca . По всей видимости, данные примеси в основном связаны с присутствием минеральных включений, не удалившихся в процессе обогащения (мусковит, кальцит, полевошпат). В тоже время характерны низкие содержания Ti и Li (табл.). Таким образом, данные анализов показали, что теоретически возможно получение высокочистых кварцевых концентратов из данного типа кварца. Учитывая современные технологии обогащения, позволяющие практически полностью удалять минеральные примеси, можно предположить, что подбор технологических схем обогащения, соответствующих специфике сырья, позволит улучшить качество кварцевых концентратов. Важным моментом, конечно, остается присут-

ствие флюидных включений в данном кварце. Удаление их потребует применения определенных, возможно нестандартных схем обогащения. В частности есть данные по положительному влиянию на очищение кварца от ГЖВ применение СВЧ излучения [2].

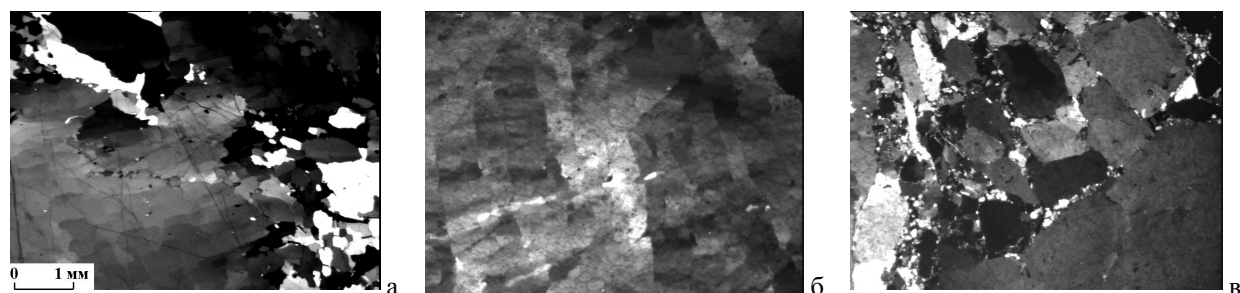


Рис. 3. Деформационные изменения в молочно-белом кварце:

а, б – катаклаз и фрагментация, в – образование вторично рекристаллизованного кварца (фото шлифов, николи+)

Таблица

Концентрации парамагнитных центров и содержания элементов-примесей в кварце

Тип кварца	Название	Номер образца	Концентрации по данным ЭПР, ppm								Валовые содержа- ния элементов- примесей, ppm			Сумма элементов- примесей, ppm
			(Ti- Li) _{900°C}	(Ti- Na) _{900°C}	(Ti- H) _{нес}	C _{Ti} сумм)	C _{Al}		C _{Ge}	Сум- ма	Al	Ti	Li	
							Исх.	Отжиг 900 ⁰ C						
Пегматитовый	Пиртима	Пр-50	1,8	1,1	0,2	3,1	18	44	0,09	21,19	28	7,4	0,84	63,89
Жильный молочно- белый	Фенькина Лампи	Ф-9	0,1	0,1	0,05	0,25	6,4	23	0,02	6,67	35	0,7	0,1	84
		Ф-32/98	0,1	0,1	0,05	0,25	5,4	19	0,02	5,67	63	0,5	0,3	234,1
Жильный катаклазированный, минерализованный	Меломайс	Мел-1	0,1	0,1	0,05	0,25	6,5	5,3	0,02	6,77	64	0,06	0,86	109,29
		Мел-27	0,1	0,1	0,05	0,25	6,6	3,9	0,02	6,87	54	0,07	0,44	101,4
Жильный гранулированный	Рухнаволок	Рхб-97/1			0,05	0,05	33	55	0,06	33,11	32,6	2,3	3,5	67,1
		PX-92	3,2	0,65	0,05	3,9	28	48	0,05	31,95	34,4	2,7	2,8	69,1
Жильный крупнозернистый стекловидный		PX-100	2,5	0,5	0,2	3,2	18	33	0,05	21,25	19,4	10,2	1,8	82,5
Жильный гранулированный	Хизоваара	XВ-129	4,1	0,2	0,2	4,5	28	44	0,28	32,78	48	10,3	2,95	102,45
Жильный крупнозернистый		Q-1	1,6	0,76	0,65	3,01	8,4	32	0,08	11,49	73	13	5	133,4
Жильный крупнозернистый стекловидный	Шуерецкое	Шу-6/98	1	0,88	0,3	2,18	8,6	28	0,02	10,8	61	15,1	0,5	141,1
Сливные кварциты	Степаново- озеро	Щ-7/98	0,2	0,5	0,1	0,8	6,1	23	0,02	6,92	41	10,5	0,15	86,15
Кварц-мусковитовые метасоматиты	Хизоваара	XВ- 1/2004	0,24	1,5	0,76	2,5	7,6	44	0,07	10,17				

Данные по содержанию C_{Al} в исходном кварце и кварце после отжига при 900°C показали, что в основном в кварце наблюдается значительное увеличение содержания структурного Al после температурной обработки, то есть для данного кварца противопоказано температурное дробление. Только в жильном кварце участка Меломайс содержание C_{Al} уменьшается при отжиге, соответственно применение термодробления для данного кварца является благоприятным.

Кроме жильного и пегматитового кварца были изучены кварцсодержащие породы – сливные кварциты участка Степаново озеро и кварц-мусковитовые метасоматиты участка Хизоваара, расположенные в пределах Парандово-Тикшеозерского зеленокаменного пояса. Для сливных кварцитов характерны сильно вытянутые, ленточные структуры со взаимопроникновением зерен и образованием грануляционной мозаичности, что связано с растворением и рекристаллизацией кварца под давлением (рис. 4 а,б). Основной минеральной примесью в кварце является мусковит, в качестве акцессорных минералов встречаются рудные (пирит, сфалерит), апатит, клиноцоизит. Содержание кварца в кварц-мусковитовых метасоматитах составляет 60-70%. Кварцевые зерна в данной породе характеризуется грануломорфными формами, ровными границами и практически отсутствием газовой-жидких включений (рис. 4в).

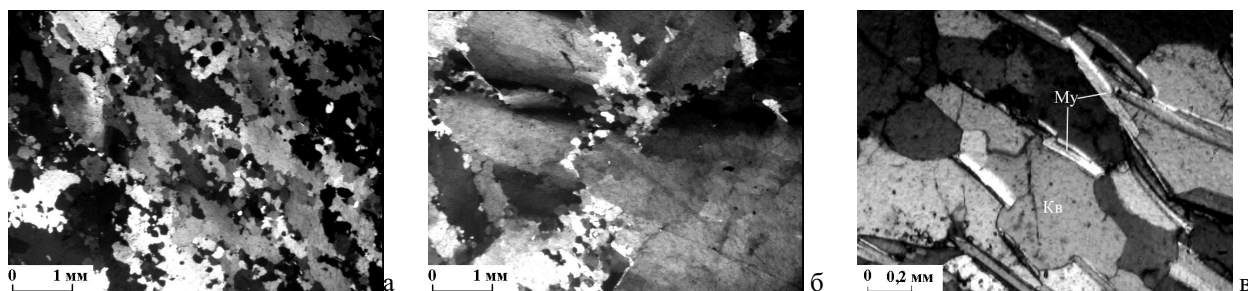


Рис. 4. Кварцсодержащие породы:

а, б – сливные кварциты (Степаново озеро), в – кварц-мусковитовые мусковиты (Хизоваара), фото шлифов, николи+

Для данных пород характерны невысокие концентрации C_{Al} и C_{Li} , содержание C_{Ti} значительно ниже в сливных кварцитах, вместе с тем содержание Ti в целом в кварцевых концентратах высокое и, по всей видимости, связано с присутствием игольчатого рутила в зернах кварца, что позволяет прогнозировать невозможность получения кварцевых концентратов, пригодных для производства плавленого кремнезема, из данного кварца

Характерной особенностью практически для всех кварцев (за исключением жильного гранулированного кварца Хизоваара) является низкое содержание C_{Ge} (в среднем 0,02-0,09 ppm). По данным Г.И. Крыловой [6] средние концентрации C_{Ge} в кварце месторождений Полярного Урала колеблются от 0,09 до 0,26 ppm, а для Иота-стандарта США составляют 0,15-0,18 ppm. В работе [11] показано, что германий в кварце является очень активным элементом. В зависимости от структурных особенностей минерала и характера его термической обработки ионы германия могут, как входить в кристаллическую структуру кварца, так и выходить из неё. Кроме того, установлена важная роль германия в полиморфных превращениях, протекающих в кварце при высоких температурах. Это дает основание предполагать, что содержание примеси германия в кварце может оказывать существенное влияние на его технологические свойства.

Проведенные исследования подтвердили более ранние наблюдения, что распределение структурных примесей в кварцах высокой чистоты и рядовых кварцах, как правило, существенно различаются. Например, соотношение концентраций содержаний структурного Ti и Al (C_{Ti}/C_{Al}) в чистых почти на порядок ниже, чем в обычных кварцах. Пониженными значениями C_{Ti}/C_{Al} характеризуются месторождения кварца высокой чистоты как Урала, так и Карелии. Данная закономерность подтверждает точку зрения о двухстадийности процесса изоморфизма в кварце и разной скорости вхождения различных примесей на этих стадиях [9]. Как предполагается, примесь Al входит в структуру кварца как на первой стадии – стадии кристаллизации, так и на второй – стадии остывания минерала. В отличие от Al примесь Ti внедряется в структуру кварца, преимущественно, на второй стадии. Причем, содержание структурной примеси титана определяется степенью термического воздействия окружающей среды на кварц, т.е. температурой образования и длительностью остывания минерала. Поэтому низкие значения C_{Ti}/C_{Al} можно объяснить тем, что влияние термического воздействия на второй стадии было весьма ограниченным. Следовательно, кварцы высокой чистоты образованы в условиях слабого проявления второй стадии изоморфизма, т.е. при низких температурах и, возможно, при относительно быстром остывании.

На основе полученных данных для различных генетических типов кварцевого сырья Карелии можно сказать, что наиболее перспективным для исследований на получение плавленого кремнезема является кварц, претерпевший низкотемпературные метаморфические преобразования с образованием вторично рекристаллизованного кварца. Именно такой кварц содержит минимальное количество структурных примесей. Вместе с тем приведенные оценки перспективности различных видов кварцевого сырья могут оказаться более оптимистическими в связи с необходимостью совершенствования стандартных образцов для количественных измерений содержаний структурных примесей в кварце, которые использовались в ВИМСе в течение 15 лет и считаются общепризнанными [9]. Введение новых стандартных образцов приведет к значительному уменьшению значений содержания Al , представленных в таблице, поэтому число образцов, представляющих перспективное сырье, возрастет.

Гранулированный кварц, который в течение долгого времени считался самым чистым кварцевым сырьем, в настоящее время в связи с ужесточением требований к чистоте кварцевых продуктов отходит на второй план. Несмотря на его химическую чистоту в исходном сырье, получение высокочистых кварцевых концентратов из данного кварца затруднительно, так как основные примеси являются структурными и не могут быть удалены в процессе технологического передела.

Таким образом, определение содержания структурных примесей в кварце на предварительных стадиях изучения кварцевого сырья является важным фактором для его разбраковки и прогноза технологических свойств.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Jung L. High purity natural quartz. Quartz Tehnology. – Inc., New. Jersey, 1992. – 550 p.
2. Белашев Б.З., скамницкая Л.С., Лебедева Г.А., Озерова Г.П. Нетрадиционные методы очистки кварца от газо-во-жидких включений / Геология и полезные ископаемые Карелии. – Петрозаводск, 2001. – С. 131-135.
3. Геология, генезис и промышленные типы месторождений кварца / Сост. Е.П. Мельников. – М.: Недра, 1988. – 216 с.
4. Емлин Э.Ф., Синкевич Г.А., Якшин В.И. Жильный кварц Урала в науке и технике. – Свердловск: Сред.-Урал. кн. изд-во, 1988. – 272 с.
5. Каменцев И.Е. влияние условий кристаллизации на вхождение посторонних примесей в решетку кварца // Вестник Ленингр. ун-та. Серия геологии и географии. – 1962. – Вып. 3, № 18. – С. 109-112.
6. Крылова Г.И. Изучение физико-химических свойств основных типов кварцев Приполярного Урала с целью разработки рекомендаций по их рациональному обогащению // Отчет ВНИИСИМС. – Александров, 2001. – 175 с.
7. Природный кварц и его физико-химические свойства // Комов И.Л., Самойлович М.И. – М.: Недра, 1985. – 124 с.
8. Раков Л.Т. Генетическое и поисковое значение структурных дефектов в кварцевых месторождениях полезных ископаемых // Минеральное сырье: Вопросы фундаментальной и прикладной минералогии. – 1997. – № 1. – С. 74-84.
9. Раков Л.Т. Двухстадийный характер изоморфизма в кварце // Материалы XV Российского совещания по экспериментальной минералогии. Сыктывкар. 2005. С. 299-301
10. Раков Л.Т. Общие закономерности образования структурных дефектов в кварце // Геохимия, 2005, №11. С. 1196-1207
11. Раков Л.Т., Крылова Г.И. Роль структурных примесей в полиморфных превращениях в кварце // Геохимия. – 2001. – № 12. – С.1277-1284.
12. Серых Н.М., Борисов Л.А., Гулин Е.Н. Проблемы лабораторного сопровождения работ на особо чистый кварц // Неметаллические полезные ископаемые России: современное состояние сырьевой базы и актуальные проблемы научных исследований. М.: ИГЕМ РАН. – 2004. С. 142-147
13. Франк-Каменецкий В.А., Каменцев И.Е. Микроизоморфизм и условия образования кварца // Проблемы кристаллохимии минералов и эндогенного минералообразования. – Л.: Наука, 1967. – С. 68-76

ОЦЕНКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЕКОВ ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

В. П. Ильина

Институт геологии Карельский НЦ РАН

Предварительная оценка нетрадиционных видов полевошпатového сырья для электротехнической керамики проводилась методом определения диэлектрических свойств спеков, полученных путем сплавления этих материалов. Диэлектрические свойства природных образцов полевых шпатов и их спеков сопоставлены с опубликованными данными [1]. ИК спектры, особенности химических связей природных полевых шпатов сохраняются после сплавления их при 1350°C и наследуются стеклофазой полученного фарфора.

Для образования стеклофазы при изготовлении электротехнической керамики применяют пегматиты (лянгарские, чупинские, елисеевские). При этом особое внимание уделяется качеству пегматитов, в которых должен преобладать K_2O , обеспечивающий по сравнению с Na_2O , повышенные диэлектрические свойства и снижающий склонность при обжиге к деформации изделий [2]. Поэтому необходимо полевошпатовое сырье со строго регламентированным количеством K_2O и Na_2O , что обусловлено различным поведением их ионов в электрическом поле. К такому сырью относится микроклиновидный пегматит северной Карелии Чупино-Лоухской пегматитовой провинции, который широко применялся для электротехнической керамики в бывшем СССР. Но в связи с ограниченностью запасов высококачественного сырья актуальным становится расширение сырьевой базы за счет нетрадиционных видов полевошпатовых пород.

К нетрадиционным полевошпатовым породам Карелии относятся щелочные и нефелиновые сиениты Элисенваары и Елетьозерского месторождений, граниты аплитовидные Лоухского района, вулканы – геллефлинты Костомукшского месторождения железистых кварцитов (вскрышные породы) и кварцевые порфиры Роза-Ламби. В мировой практике подобные породы являются обычным источником минерального сырья, имеющего ряд преимуществ по отношению к пегматитам.

Спеки (материал в стеклообразном состоянии, в котором он находится в керамике), готовились из тонкоизмельченных (размер частиц 0.063мм) порошков обогащенных кварц-полевошпатовых пород путем спекания их в тиглях при 1350°C в течение 3 часов. Вязкость расплавов определяли по длине растекания, при 1350°C, штабика, приготовленного из порошка концентратов. Подложку в силитовой печи устанавливали под углом 45°.

Для измерения диэлектрических свойств подготовлены образцы из спеков методом шлифования на абразивном круге до размеров : – диаметр – 20 – 25 мм, высота 2 – 3 мм. Измерение величин ϵ , $\lg \rho$, $\tan \delta$ проводили с использованием моста емкостью Е-7-8; рабочая частота 1000 Гц, температура 20°C. Измерения выполнены сотрудниками лаборатории геофизики Клубуковым Б.Н. и Коршуновой В.И. Расчет электрических

свойств осуществлялся с введением добавочного коэффициента для учета дополнительной емкости на не покрытых электродами участках образца по формулам, соответственно: диэлектрическая проницаемость- $\epsilon = \kappa_1 / \kappa_2$, где $\kappa_1 = 1,14$ – коэффициент датчика, κ_2 – коэффициент толщины образца, c – емкость образца; удельное электрическое сопротивление- $\lg \rho = \kappa / g \cdot l$, где $\kappa = 33,55$ – коэффициент датчика, g – проводимость, l – толщина образца; диэлектрические потери- $\lg \delta = 0,175 \cdot g / c$, где c – емкость образца, g – проводимость.

В таблице 1 приведен минералогический, а в таблице 2 химический составы исследованных нетрадиционных видов полевошпатовых пород.

По результатам исследования минералогического состава нетрадиционных полевошпатовых пород разных видов и месторождении наблюдаются существенные различия их диэлектрических свойств в зависимости от содержания кварца, микроклина, плагиоклаза [3].

Таблица 1

Минералогический состав нетрадиционных видов полевошпатового сырья.

Полевошпатовое сырье	Минеральный состав, масс.%		
	Кварц	Микроклин	Плагиоклаз
Вулканист Роза-Ламби	44,0	44,2	11,8
Вулканист Костомукша	24,2	68,0	7,8
Сиенит Элисенваара	–	55,8	44,2
Сиенит Елетьозеро	–	64,5	35,5
Гранит-аплит Елетьозеро	28,8	Ортоклаз – 30,8	40,4
Гранит-аплит Слюдозеро	22,0	Ортоклаз – 11,1	66,9

Зависимость изменения ϵ спеков от содержания в них кварца, представленная на рис. 1-а, обусловлена увеличением количества кварца в полевошпатовых породах (исключая сиениты). Высокое, в отличие от других пород, количество кварца (44 мас.%), в вулканитах месторождения Роза-Ламби, снижает ϵ спека до – 5,4, что близко к ϵ пегматит-гранитам Малышевского месторождения – 5,6 содержащих 43,6 мас.% кварца .

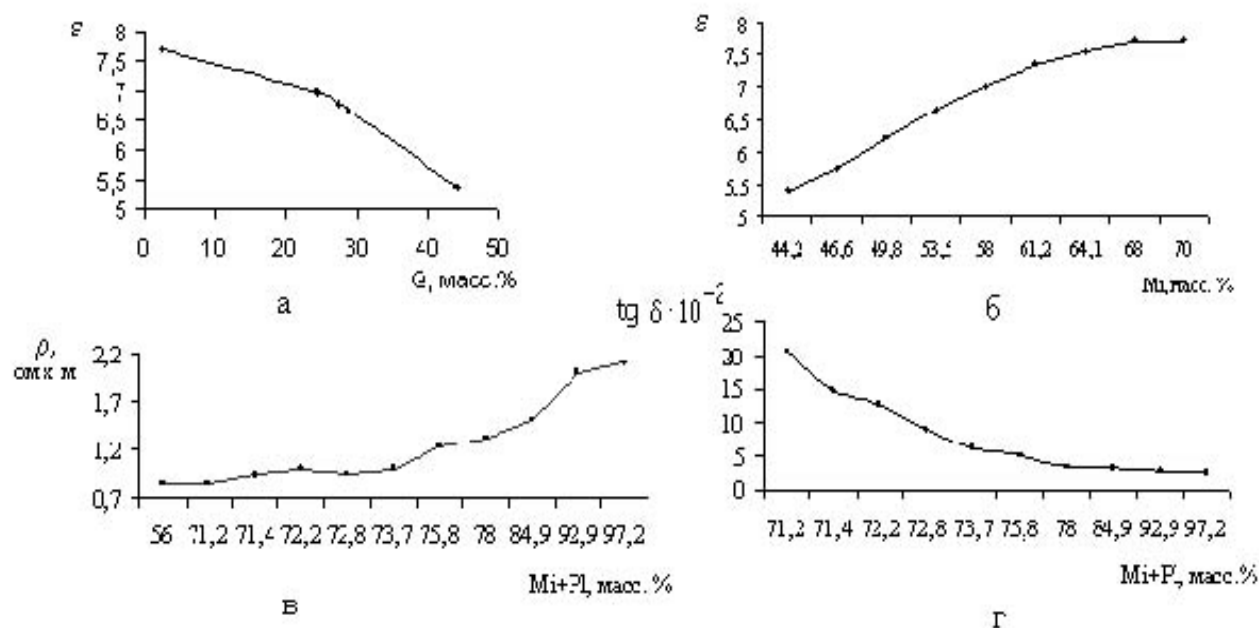


Рис. 1 Зависимость изменения диэлектрических свойств спеков от состава полевошпатовых пород

Диэлектрическая проницаемость спеков существенно изменяется от содержания микроклина и плагиоклаза, образующих стеклофазу [4,5]. С повышением микроклина в породах увеличивается ϵ их спеков (рис.1-б). Спекы пегматитов Хетоламбино и калиевой геллефлинты Костомукши, несмотря на различный минералогический и химический состав, содержащие большое количество микроклина (соответственно 70, 68%), имеют одинаковые показатели диэлектрической проницаемости (7,7) (табл. 3). Это можно объяснить тонкозернистой структурой геллефлинты, способствующей интенсификации образования стеклофазы, обогащенной калиевым полевым шпатом, и растворением в ней тонкодисперсного кварца при 1350°C.

Химический состав нетрадиционных видов полевошпатового сырья.

Полевошпатовое сырье	Содержание компонентов в масс. %											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	BaO	SrO	п.п.п.
Вулканист Роза-Ламби	73,16	—	13,40	0,15	0,32	0,18	1,48	11,07	0,04	—	—	0,20
Вулканист Костомукша	65,56	0,10	16,76	0,20	0,63	0,58	0,99	14,16	0,10	—	—	0,92
Сиенит Элисенваара	60,62	0,12	19,89	0,63	0,21	2,20	5,35	5,94	0,06	2,25	2,33	0,40
Сиенит Елетьозеро	63,20	0,10	20,96	0,07	0,10	1,04	7,31	6,57	0,02	0,24	0,11	0,28
Гранит-аплит Елетьозеро	65,84	0,05	18,99	0,14	0,16	0,79	2,92	10,91	0,04	—	—	0,16
Гранит-аплит Слюдозеро	66,28	0,03	19,63	0,02	0,10	0,15	1,43	12,26	0,04	—	—	0,06

Для нефелинового сиенита Элисенваары, не содержащего кварц, но с высоким количеством микроклина (64,5%), также характерен высокий показатель ϵ спека (6,65). Спекы геллефлинты и сиенита Елетьозеро характеризуются меньшей вязкостью, как видно на рис. 2, по сравнению с другими породами. Высокая растекаемость геллефлинты и сиенита Елетьозеро обусловлена, как повышенным количеством оксида калия в стеклофазе, так и увеличением количества стеклофазы за счет высокого содержания микроклина в сырье. Диэлектрическая проницаемость спеков плагиоклазовых пород: сиенита Элисенваары (3,26), и гранитов Елетьозеро (3,87) и Слюдозеро (4,02) (табл.3) значительно ниже, чем у спеков с микроклиновой стеклофазой, что, по видимому, связано с образованием жидкой фазы с большей вязкостью, плохо растворяющей кварц. Повышенное содержание ортоклаза и анортитовой составляющей в составе стеклофазы спеков гранитов вызывает снижение ее вязкости и вследствие этого снижает их диэлектрическую проницаемость. Присутствие оксидов бария и стронция в бескварцевом щелочном сиените Элисенваары, также способствует снижению показателя ϵ спека.

Как видно на рис. 1-в, электросопротивление спеков увеличивается с повышением суммы микроклина и плагиоклаза в полевошпатовом сырье. Наибольшее влияние на повышение электросопротивления оказывают щелочноземельные оксиды. Высокое электросопротивление $2,0-1,51 \times 10^{10}$ ом $\times$ м, по сравнению с пегматитами, характерно для сиенитов Элисенваары и Елетьозеро, отличающихся как высоким количеством микроклина и плагиоклаза так и содержанием бария и стронция.

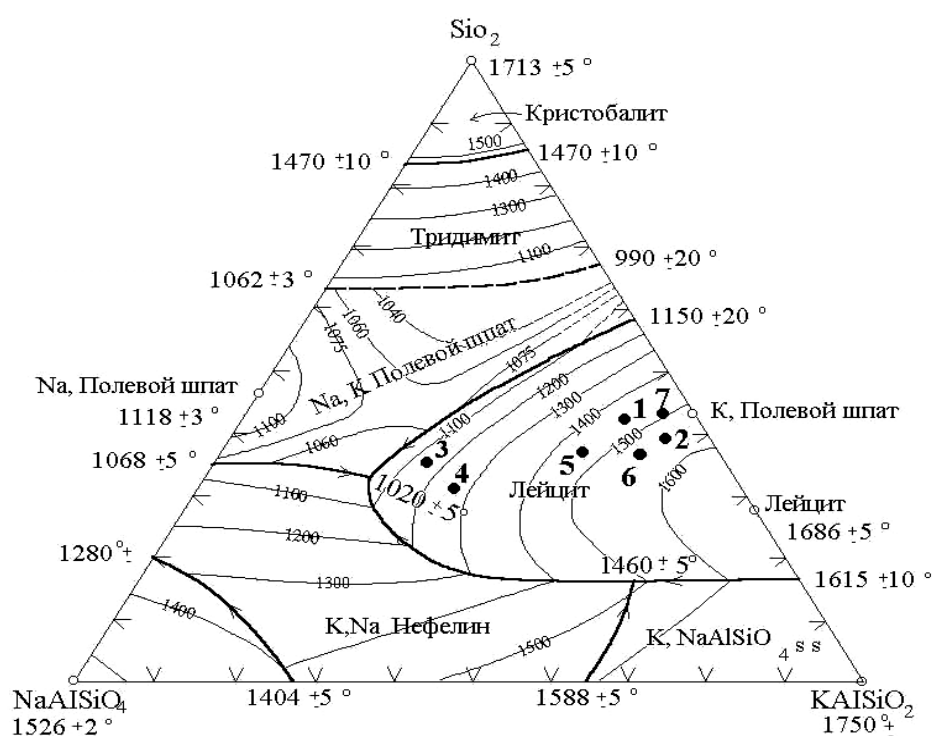


Рис. 2. Растекаемость спеков при 1350°C

На величину тангенса угла диэлектрических потерь фарфора большое влияние оказывает не только соотношение K_2O / Na_2O , но и сумма щелочных оксидов, так как при возрастании суммы $K_2O + Na_2O$ увеличивается содержание ионов Na^+ — основных носителей тока в электрофарфоре [1]. Кроме того тангенс угла ди-

электрических потерь ($\text{tg}\delta$) позволяет установить возможность применения материала в электроизоляционной керамике. В связи с этим изучена зависимость изменения $\text{tg}\delta$ от содержания суммы микроклина и плагиоклаза (рис. 1-г). Исследования спеков показали, что высокое содержание суммы микроклина и плагиоклаза в полевошпатовых породах способствует увеличению количества стеклофазы в спеках и обуславливает снижение показателей тангенса угла диэлектрических потерь. Низкий $\text{tg}\delta$, по сравнению с другими породами, у спеков: сиенитов Елетьозеро (0,032), Элесенваары (0,025) и калиевой геллефлинты Костомукши (0,028). Повышенное содержание плагиоклаза в гранитах Елетьозеро (0,278) и Слюдозеро (0,207) и кварца в кварцевом порфире Роза-Ламби (0,160) обуславливают возрастание тангенса угла диэлектрических потерь их спеков.

Для оценки нетрадиционных полевошпатовых пород и сравнение с пегматитом Хетоламбино (рис. 2, точка –7) использовали диаграмму состояния системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, на основе которой определялась температура их плавления.

Из диаграммы видно, что точки составов исследованного полевошпатового сырья лежат в области К-полевого шпата, что свидетельствует о повышенном количестве оксида калия особенно в спеках геллефлинты (точка 2) и пегматита (точка 7), характеризующихся высоким содержанием микроклина. Температуры плавления геллефлинты (2) и пегматита (7) близки, а сиениты более легкоплавкие и приближаются к области К, Na полевого шпата.

Таблица 3

Диэлектрические свойства спеков нетрадиционных полевошпатовых пород

Полевошпатовые породы	Свойства		
	ϵ	$\rho \times 10^{10} \text{ ом} \cdot \text{см}$	$\text{tg } \delta$
Пегматит Уракко	7,53	0,94	0,150
Пегматит Кюрьяла	6,8	2,10	0,027
Вулканист Роза-Ламби	5,4	1,40	0,058
Вулканист Костомукша	7,7	1,23	0,045
Сиенит Елетьозеро	6,5	1,51	0,032
Сиенит Элесенваара	3,26	2,00	0,025
Гранит-аплит Елетьозеро	3,87	1,74	0,207
Гранит-аплит Слюдозеро	4,02	1,32	0,278

Таким образом, результаты изучения электрических свойств спеков кварц-полевошпатовых пород показали, что значения диэлектрической проницаемости аналогичны как у спеков пегматитов Уракко (7,53), так и у спеков нетрадиционного сырья – калиевой геллефлинты (7,7), отличающихся наибольшим содержанием микроклина. Высокое содержание кварца в породах снижает диэлектрическую проницаемость, как видно у вулканистов Роза-Ламби, а также у пегматит-гранитов Лянгарского (5,6) и Малышевского месторождений (5,6). Спекы сиенитов Элесенваары и Елетьозеро характеризуются низким тангенсом угла диэлектрических потерь (0,025, 0,032) и высоким удельным электрическим сопротивлением (2,0; 1,51) $10^{12} \text{ ом} \times \text{см}$ по сравнению с другими породами. Следует отметить, что диэлектрические свойства нетрадиционных видов кварц-полевошпатовых пород аналогичны пегматитам, а по некоторым показателям ($\text{tg}\delta$, $\text{lg}\rho$) превосходят и соответствуют ГОСТ 2484-85 для электрофарфора – диэлектрическая проницаемость – не выше 7, тангенс угла диэлектрических потерь – 0,030, электросопротивление – $1 \times 10^{12} \text{ ом} \times \text{см}$.

Установлено, что большое количество микроклина в калиевой геллефлинте и сиенитах Елетьозеро обуславливает образование стеклофазы меньшей вязкости, что соответствует большей растекаемости их спеков. С увеличением количества стеклофазы, обогащенной оксидом калия, как наблюдается у геллефлинты и сиенитов Елетьозеро, улучшаются диэлектрические свойства ($\text{tg}\delta$, $\text{lg}\rho$), а показатели ϵ близки к пегматита. Для электрофарфора перспективными, по показателям диэлектрических свойств, являются сиениты Елетьозеро ($\epsilon - 6, 5$; $\text{tg}\delta - 0,032$; $\text{lg}\rho - 1,51 \cdot 10^{12} \text{ ом} \times \text{см}$).

Таким образом нетрадиционные виды кварц-полевошпатового сырья могут использоваться в качестве полевошпатового компонента в электротехнической керамике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология электрокерамики. / По ред. Г.Н. Маленниковой. М., «Энергия», 1974. -224 с.
2. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. – 590 с.
3. Ильина В.П. Технологическая оценка полевошпатовых пород Лоухского района // Геолого-технологическая оценка промышленных минералов и пород Республики Карелия и отдельных регионов Европейского континента. Петрозаводск, 1997. – С.57-59.
4. Холодок Н.И., М.И.Голод, И.А.Попова, Б.Н.Клабуков. О диэлектрической проницаемости калиевых полевых шпатов пегматитовых жил // Пегматиты Карелии и Кольского полуострова. Петрозаводск, 1977. – С.160-164.
5. Голод М.И., Гродницкий Л.Л., Клабуков Б.Н. О диэлектрической проницаемости плагиоклазов из пегматитовых жил Кольского полуострова// Минералы – индикаторы особенностей вмещающей их среды. Л., «Наука», 1975. – С. 47-49.

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД КАРЕЛИИ

Луговская И.Г.

ВИМС, Москва

Шунгитовые породы Карелии представляют собой перспективный в отношении сорбционно-каталитических свойств, редкий по составу природный материал, сформированный в основном кварцем и шунгитовым углеродом. В подчиненном количестве в шунгитовых породах (ШП) могут присутствовать карбонаты (кальцит, сидерит, доломит) слоистые алюмосиликаты (каолинит, иллит), сульфиды и гидроксиды железа (пирит, гетит, гидрогетит).

Согласно ранее полученным данным ШП проявляют каталитическую активность в реакциях дегидратации спиртов (реакции кислотно-основного типа) [1], разложения пероксида водорода [2], окисления СО [3], могут успешно использоваться в качестве сорбционных материалов в процессах очистки сточных вод от нефтепродуктов и фенола [4,5]. В последнее время проводятся работы по исследованию каталитических свойств термоактивированной шунгитовой породы в реакциях окисления СО и окислительного дегидрирования этилбензола в стирол, а также по использованию шунгитового сорбента в процессах разложения особо токсичного и реакционноспособного соединения -1,1-диметилгидразина (НДМГ) [6].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании возможного использования современных минералого-аналитических методов для оценки технологических свойств шунгитовой породы в реакциях окисления СО, окислительного дегидрирования этилбензола в стирол и разложения НДМГ.

Изучалась порода Ш разновидности Зажогинского месторождения с содержанием около 30% мас. углерода, 55% оксида кремния, 5% оксида алюминия, 1-2% соединений железа и широкого спектра примесей. Для исследований породу измельчали до крупности -2,5+0,5 мм. При исследовании каталитических свойств ШП проводилась ее термическая активация при температуре 500° С, а также термоокислительная и термовосстановительная активация катализаторов на ее основе в токе воздуха (3 или 6 ч) или водорода (6 ч) соответственно. Активированная ШП показала каталитическую активность во всех изученных реакциях.

Специфические особенности состава и строения шунгитовых пород, а также продуктов получаемых на их основе (тесное срастание главных породообразующих фаз: шунгита и кварца, их микроструктурные особенности, переменное количество, присутствие нескольких разновидностей этих минералов) предопределило комплексный подход к их изучению.

Качественный минералогический анализ исходной шунгитовой породы и сорбционно-каталитических материалов на ее основе проводится методами оптической микроскопии (стереоскопический микроскоп Leica MZ 12.5B, световой микроскоп Leica RD-DM, фирма Leica, Германия). Он позволяет определить главные породообразующие минералы и выявить характер их взаимоотношения.

Шунгитовые породы (рис.1) имеют массивную, реже пятнистую текстуры. Структура пород скрытокристаллическая. Достаточно широко развиты наложенные (вторичные) текстуры – вкрапленность (вкрапленность – гнездо, – линзовидная) и прожилковая, обусловленные развитием вторичных минералов, прежде всего, кварца и пирита.

Иногда обломки породы имеют прожилковую текстуру; прожилки выполнены средне-, мелкокристаллическим кварцем, в ассоциации с которым иногда встречается пирит. В незначительном количестве (до 5%) в пробе присутствуют сростки, в которых количественно преобладает кварц (рис.2).



Рис.1. Обломок шунгитовой породы. Увел.8.



Рис.2. Обломок шунгитовой породы (богатый сростком кварца, цвет белый). Увел.10.

По существу такие сростки являются фрагментами прожилков. Средне-крупнокристаллический кварцевый агрегат сложен плотно прилегающими кристаллами призматической и шестоватой формы.

Порода неравномерно пиритизирована, наряду с тонко-рассеинным пиритом, отмечаются достаточно крупные идиоморфные кристаллы и их скопления, обычно тесно ассоциирующие с поздним кварцем (рис.3).

Особенностью шунгитовых пород, формирующих данную пробу, является резко меняющееся количественное соотношение главных породообразующих минералов: шунгита и кварца. В целом, в пробе преобладают обломки пород существенно шунгитового состава, что подтверждено рентгеномографическим анализом, но в тоже время отмечается значительное количество обломков пород, в которых содержание кварца и шунгита близко одинаковое, либо кварц доминирует.

Минеральный состав и характер срастания минералов исследовали комплексов методов: рентгенографическим, оптико-геометрическим и рентгеновской микротомографии.

По минеральному составу определенному рентгенографическим методом (табл. 1) главными породообразующими минералами являются кварц, шунгит. В подчиненном количестве присутствуют полевой шпат (альбит и микроклин), карбонаты (доломит, кальцит) и слоистые алюмосиликаты (гидрослюда, хлорит). Рентгенографический анализ позволил установить все породообразующие фазы, включая акцессорные (содержание менее 1%). Однако, этим методом невозможно надежно идентифицировать и количественно оценить фазу шунгита, так как она является рентгеноаморфной. С этой целью был использован метод рентгеновской микротомографии. Необходимо отметить, что для шунгитового сырья данный метод использовался впервые.

Содержание породообразующих минералов определено рентгеномографическим и оптико-геометрическим методами (в отдельных обломках). Количество шунгита в породе варьирует от 14,49% до 86,98%, кварца от 12,47% до 85,51%. Содержание пирита в отдельных случаях достигает 11,8%. В незначительном количестве присутствуют карбонаты.

Шунгит и кварц присутствуют в породе в тесном срастании, что четко видно на рентгеномограммах (рис.4). По данным оптико-геометрического анализа изображения, основная масса зерен шунгита (92,56%) имеет размер менее 0,074 мм. Средний размер зерен шунгита 0,032 мм.

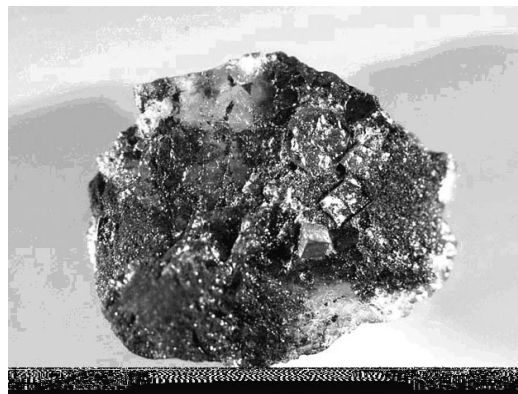


Рис. 3. Обломок шунгитовой породы (полиминеральный агрегат; кварц – белое, пирит). Увел. 10.

Таблица 1

Минеральный состав шунгитовой породы по данным количественного рентгенографического анализа

Минеральная фаза	Содержание минералов в%
Кварц	41
Гидрослюда	2,5
Альбит	3,0
Микроклин	1,5
Доломит	0,7
Кальцит	0,6
Пирит	0,8
Хлорит	0,5
Р/а фаза	49

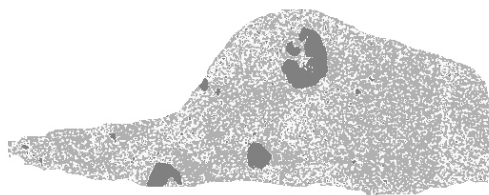
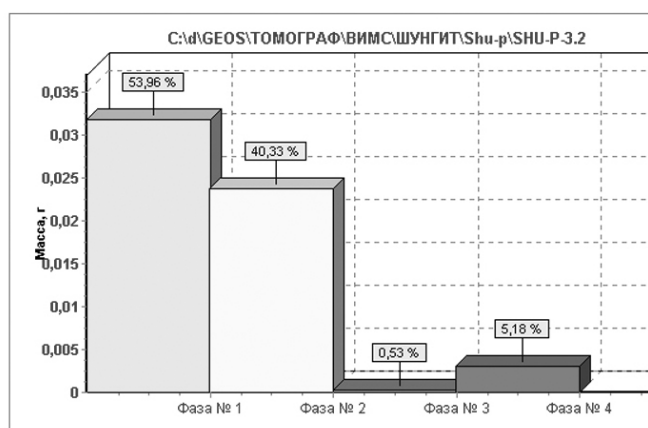


Рис.4. Томограммы обломков шунгитовой породы: шунгит (светло-серый цвет), кварц (белый цвет), пирит (темно-серый цвет), кальцит

Изучение ШП подвергшейся термоокислительной обработке показало, что наряду с уменьшением доли углеродистой составляющей наблюдается ее концентрирование (в результате миграции) во внешней периферийной зоне зерен и в зонах внутренних разломов (рис. 5).

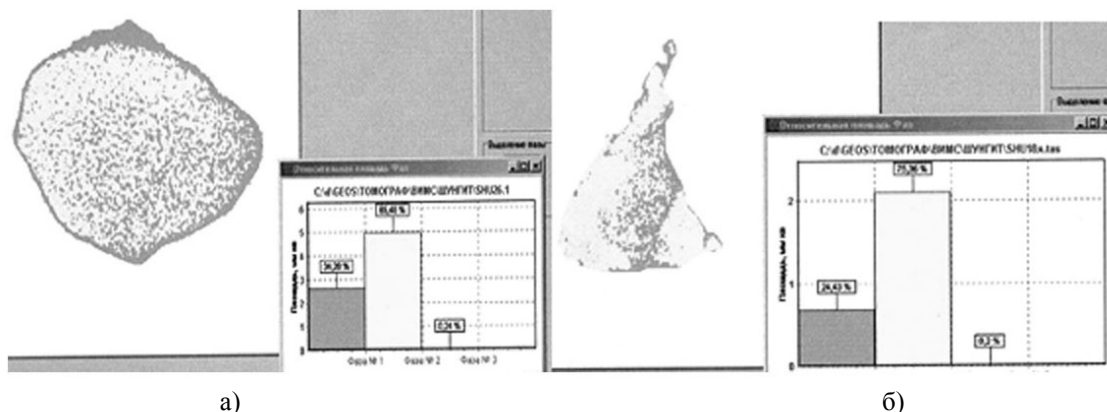


Рис.5. Томограммы ШП, подвергшейся термоокислительной обработке: шунгит (темно-серый цвет), кварц (белый цвет), гетит.

а) температура обработки – 400° С; б) температура обработки – 500° С.

Отмечается также подобное концентрирование в периферийной зоне зерен железосодержащей минеральной фазы (минералы группы гетита – гидрогетит). Таким образом, концентрация углерода и железосодержащей фазы на поверхности термоактивированной ШП оказывается выше их среднего содержания в породе.

Изменяя условия окислительной активации можно регулировать среднее содержание углерода в ШП, содержание углерода и железосодержащей фазы на поверхности и, соответственно, сорбционные характеристики материала. Установлено, что активация ШП в муфельной печи на воздухе при 400° С в течение 8 ч вызвала уменьшение содержания углерода до 28%, увеличение удельной поверхности от 9 до 28 м²·г⁻¹, возрастание объема пор более, чем на порядок, а среднего радиуса пор – в 45 раз. Активация при 500° С в течение 1 ч приводила к уменьшению содержания углерода до 22%, увеличению $S_{уд}$ до 29 м²·г⁻¹, объема пор в 7 раз, а среднего радиуса пор в 8 раз [7]. При этом, как показало изучение адсорбции паров бензола, в образцах происходило развитие микропористой структуры.

ИК- спектроскопический анализ исходной ШП, а также образца подвергнутого термоокислительной активации (рис.6) показал, что в спектре исходного образца (спектр 1) присутствует несколько полос в области 1200 – 400 см⁻¹, которые относятся к валентным колебаниям Si-O. В высокочастотной области обнаружена широкая полоса 3500 см⁻¹, обусловленная присутствием воды или гидроксильных групп, связанных с поверхностью водородной связью. Термоокислительная обработка ШП (спектр 2) повышает интенсивность полос, что связано с выгоранием части углерода, и улучшает их разрешение, что обычно свидетельствует об уменьшении дефектности решетки.

Термовосстановительная обработка (рис.7) почти не изменяет вид спектра в области валентных колебаний Si-O (спектр 1), однако вызывает повышение интенсивности полосы 3450-3500 см⁻¹ и появление полосы 1630 –1640 см⁻¹(ср. спектр 1на рис. 1), соответствующей деформационным колебаниям НОН, что свидетельствует об образовании воды, вероятно, вследствие частичного восстановления примесных оксидов металлов, присутствующих в ШП.

Термоокислительно-восстановительная активация (спектр 2) приводит к возрастанию интенсивности всех полос по сравнению со спектром 1, что связано с выгоранием части углерода. При этом интенсивность полос 3500 и 1640 см⁻¹ свидетельствующих, как предполагалось выше, о присутствии воды увеличивается в результате восстановления примесных оксидов металлов.

Таким образом, термоокислительная активация ШП способствует уменьшению содержания в ней углерода, уменьшению дефектности структуры, развитию пористости и росту удельной поверхности, а также обогащению приповерхностных слоев зерен углеродом и железосодержащей минеральной фазой. При термовосстановительной активации ШП основным эффектом является частичное восстановление примесных оксидов металлов. При термоокислительно-восстановительной активации эффекты, обусловленные термоокислительной и термовосстановительной обработками, сочетаются.

Основными катализаторами обезвреживания выхлопных газов в настоящее время являются дорогостоящие многокомпонентные системы на основе благородных металлов (Pd, Pt, Rh). Интенсивно продолжаются поиски альтернативных катализаторов с использованием, в частности, оксидов переходных металлов.

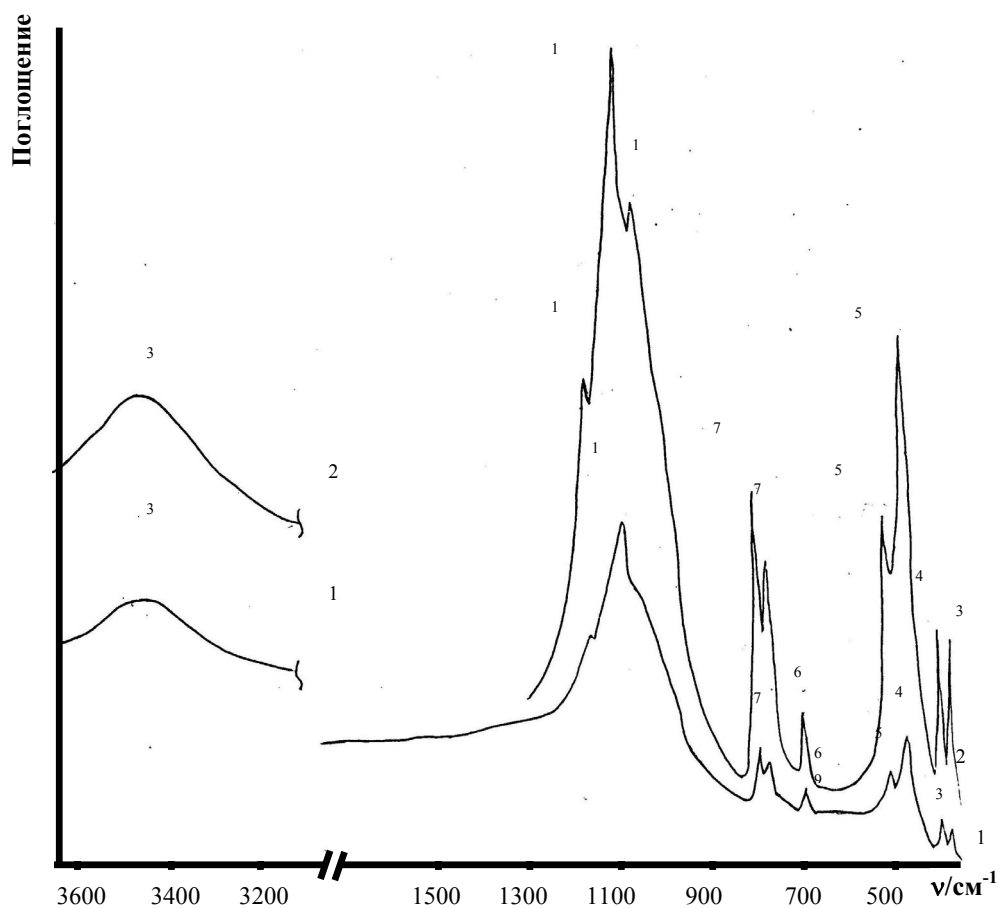


Рис. 6. ИК-спектры исходной (1) и термоактивированной в течение 6 ч при 500° С на воздухе (2) ШП

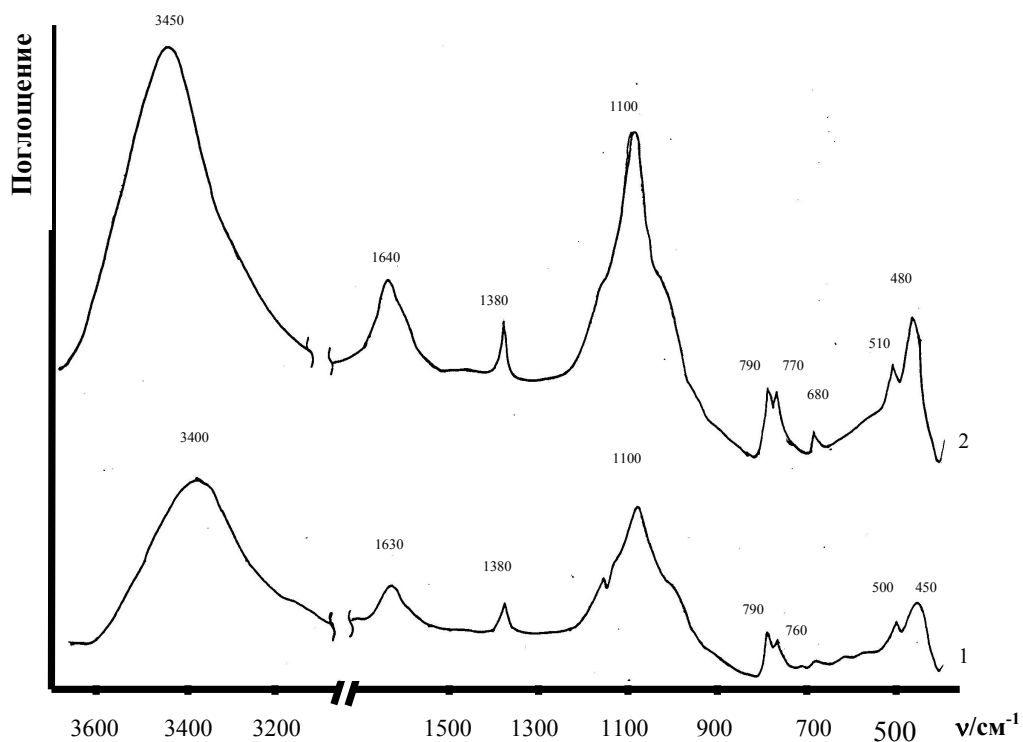


Рис. 7. ИК-спектры ШП после термовосстановительной активации в течение 6 ч (1) и термоактивации в течение 6 ч при 500° С в токе воздуха с последующим восстановлением водородом в течение 6 ч при 500° С (2)

На рис. 8 показано, как влияет способ термоактивации ШП на каталитическую активность, характеризуемую зависимостью конверсии СО от температуры. Кривая 1 указывает на низкую активность ШП после термовосстановительной активации (6 ч): конверсия СО при 400° С составляет около 20%. Термоокислительная активация в течение 3 или 6 ч позволяет достичь 100%-ной конверсии СО при температурах около 500 и 400° С соответственно. Термоокислительно-восстановительная активация еще больше повышает активность ШП (кривая 4): конверсия 100% достигается при 370-380° С.

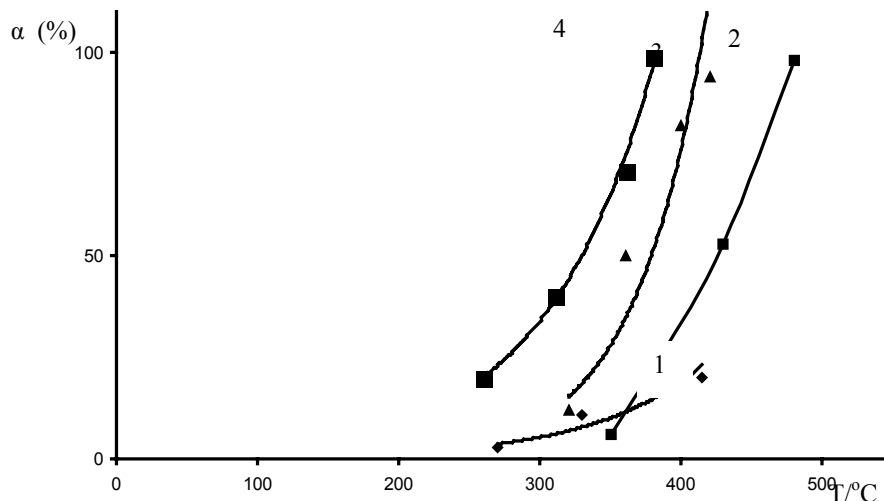


Рис.8. Температурная зависимость конверсии СО (α) для ШП, термоактивированной различными способами:

термовосстановительная активация в течение 6 ч (1); термоокислительная активация в течение 3 (2) и 6 ч (3); термоокислительно-восстановительная активация (4).

Рост каталитической активности в результате термоокислительной активации ШП можно объяснить увеличением доступности для реагентов активных центров — оксидов примесных переходных металлов. Это происходит вследствие удаления части экранирующего их углерода и диффузии ионов железа и других примесных ионов (в отношении железосодержащей минеральной фазы это подтверждено методами минералогического анализа и РВМТ) в приповерхностные слои зерен. Последующая термовосстановительная обработка может привести к дальнейшему повышению активности в результате частичного восстановления оксидных центров на поверхности породы, что подтверждается данными ИК-спектроскопии.

Промышленный синтез стирола в основном осуществляется путем дегидрирования этилбензола при температурах 550-650° с использованием катализаторов на основе Fe_2O_3 , содержащих карбонат калия, оксиды церия и молибдена, а в последних поколениях катализаторов также оксиды V, W, Li, Mg, Ca, Ti, Zr, Ni и Co.

Исходная ШП не обнаруживала заметной активности в реакции окислительного дегидрирования этилбензола в стирол, в то время как конверсия и селективности достигаемые на термоактивированной ШП при относительно низкой температуре (при 360° С, конверсия этилбензола составила около 50%, а селективность по стирулу 80%) вполне сравнимы со средними показателями работы промышленных катализаторов (при 650° С, конверсия 50-60%, а селективность по стирулу до 90%). Относительно низкие температуры окислительного дегидрирования стирола на ШП указывают на вероятную активность углеродной составляющей ШП в этой реакции.

Активными катализаторами окислительного дегидрирования, наряду с оксидами металлов и благородными металлами (450-700° С), являются углеродсодержащие материалы, в частности оксид железа, нанесенный на активированный уголь, и сам активированный уголь [8]. Температура реакции на угле составляет всего 350-400° С. Полученные результаты показали, что в этой реакции оптимальная температура катализа (360° С) соответствует наблюдаемой на угле, что указывает на вероятную активность углеродной составляющей ШП.

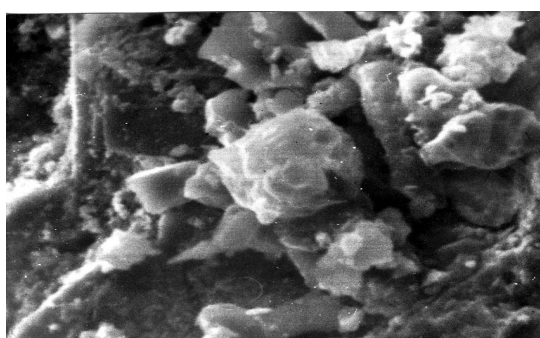
На примере изученных реакций показано, что активность в катализе могут проявлять как углеродная составляющая, так и примесные оксиды ШП. Формирование активной поверхности происходит при термоактивации ШП. Варьируя условия термоактивации, можно регулировать содержание углерода в породе, степень концентрирования углерода и оксидных примесей на поверхности, величину удельной поверхности, размер и структуру пор, что открывают перспективы управления свойствами каталитических систем на основе шунгитовой породы.

Учитывая, что современные промышленные катализаторы синтеза стирола и обезвреживания выхлопных газов многокомпонентны и сложны в изготовлении, а последние, кроме того, содержат в своем составе дорогие благородные металлы, можно сделать вывод о целесообразности развития исследований по разработке катализаторов для этих реакций с использованием природного материала — шунгитовой породы.

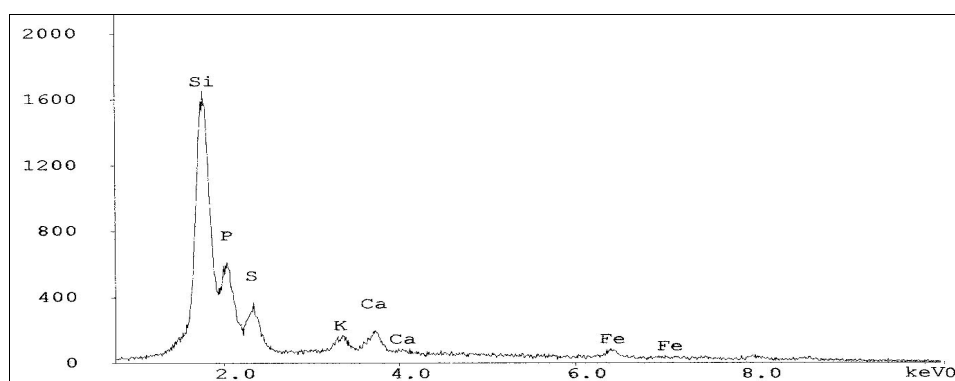
Важным моментом в использовании любого сорбционно-каталитического материала считается его регенерация. При использовании шунгитового сорбента в процессах очистки загрязненных грунтов от технологических проливов жидкостей, содержащих 1,1-диметилгидразин (НДМГ) последующую его регенерацию проводят отмывкой раствором фосфатного буфера. Поведение шунгитового сорбента после обработки его раствором НДМГ и последующей отмывки фосфатным буфером исследовалось методом электронной микроскопии. Основной задачей являлось определение взаимодействия соединений фосфора с главными породообразующими минералами ШП.

Установлено, что кварц-шунгитовая матрица весьма неоднородна по составу. На рентгеноспектральных спектрах отмечаются кремний, кальций, калий, алюминий, железо, сера, которые входят в состав породообразующих минералов. Содержание фосфора в матрице существенно шунгитового состава незначительно (менее 0,01%) и, по-видимому, связан он исключительно с шунгитом.

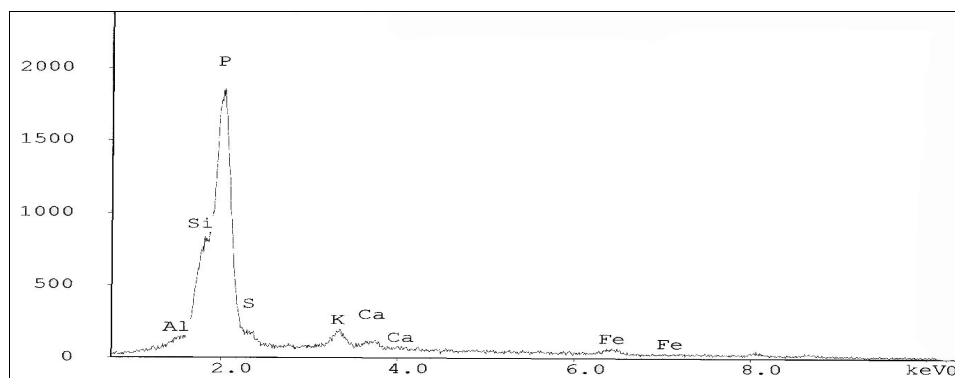
Относительно крупные кристаллы кварца размером 15-85 мкм имеют в основном идиоморфную (призматическую, таблитчатую) и панидиоморфную форму. Отдельные зерна характеризуются блочным микростроением (рис.9). Иногда отмечаются агрегаты кварца размером менее 5 мкм, состоящие из зерен размером менее 0,5 мкм. Рентгеноспектральным анализом установлено, что зерна кварца наряду с алюминием, который, видимо, изоморфно входит в его структуру, содержат фосфор (до 1%), а иногда и серу (рис.9).



а)



б)



в)

Рис.9. а) – кварц идиоморфного, панидиоморфного и блочного микростроения,увел. x3000;б, в) – рентгеноспектральные спектры, снятые с кварца.

Значительное количество фосфора в данном случае связано с использованием при обработке пробы фосфатного буфера. Отмечается различный характер распределения сорбированного вещества в кварце. В отдельных случаях наблюдается на поверхности зерен кварца пленка (с высоким содержанием фосфора), которая «дышит» под электронным пучком, о чем свидетельствует изменение со временем рисунка поверхности зерна. Иногда пленка, покрывающая зерна кварца, неоднородная. На спектре (рис.9) содержание фосфора настолько высоко в центре зерна кварца, что даже вуалирует количество пороодообразующего кремния.

Таким образом, при исследовании методом электронной микроскопии проб ШП загрязненной НДМГ и регенерированной фосфатным буфером, установлено отсутствие влияния реагента и загрязнителя на химический состав и структуру шунгитовой матрицы, зафиксирована способность кварцевой составляющей концентрировать фосфатный буфер. Регенерированная таким способом ШП может быть использована повторно для разложения НДМГ, а наличие адсорбированных фосфатов при смешении ШП с грунтом позволяет рассматривать ее как удобрение пролонгированного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов В.А., Калинин Ю.К., Дюккиев Е.Ф. Шунгиты – новое углеродистое сырье. Петрозаводск: Карелия, 1984. – 124 с.
2. Дюккиев Е.Ф., Туполев А.Г. Шунгитовые породы Карелии. Карелия. Петрозаводск. 1981. – 182 с.
3. Луговская И.Г., Сладкова Г.А., Крылов И.О. и др. Активность горной породы – шунгита и нанесенных на шунгит оксидных катализаторов в реакции окисления СО // Журн. прикл. химии, 1999, Т.72. №11. – С.1518-1524.
4. Ануфриева С.И., Исаев В.И., Лосев Ю.Н. и др. Оценка возможности использования природного материала – шунгита для очистки нефтесодержащих стоков // Труды международного симпозиума. Петрозаводск, 2000. – С. 156-161.
5. Луговская И.Г., Ануфриева С.И., Герцева Н.Д., Крылова А.В. Глубокая очистка водных растворов от фенола с использованием шунгитовой породы // Журн. прикл. химии, 2003, 76, – С.791-796.
6. Манышев Д.А., Попов О.В., Островская В.М. и др. Способ обезвреживания технологических проливов жидкостей, содержащих 1,1-диметилгидразин. 2005, №16. Патент RU 2253520.
7. Крылов И.О., Луговская И.Г., С.И.Ануфриева С.И., Крылова А.В. Влияние термической обработки на состав и физико-химические свойства шунгитового сорбента // Журн. прикл. химии. 2003. Т.76. – С.1273-1277.
8. Алхазов Т.Г., Лисовский А.Е. Окислительное дегидрирование углеводородов. Москва: Химия, 1980. – 239с.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД

Тяганова В.И., Заверткин А.С.

Институт геологии Карельского НЦ РАН

Поведение шунгитовых пород (ШП) в процессе нагрева при различных термических режимах определяется их термической стойкостью (ТС). Комплексное изучение ШП позволило обозначить основные направления их использования в электротермических процессах, в частности, при выплавке ферросилиция, силикомарганца, металлургического карбида кремния, в качестве карбюризатора при получении синтетического чугуна и др. [1]. Перспективным сырьем для производства ферросплавов являются ШП группы – III А (классификация Ю.К.Калинина) с содержанием углерода 30-33%, кремнезема 52-58%, плотности 2300-2400 кг/м³ [2]. Ограничивающим фактором использования в этих процессах ШП может стать их разрушение при нагреве, т.е. нетермостойкость, о чем свидетельствуют заводские испытания. При выплавке ферросилиция с применением в составе шихты добавки шунгитовой породы было отмечено увеличение содержания фр.1-10 мм при использовании исходного кускового материала 20-50 мм в результате его разрушения, что способствовало уплотнению шихты, снижению газопроницаемости и, в конечном счете, к увеличению расхода электроэнергии, снижению производительности печи и удорожанию процесса получения готовой продукции [3]. Ранее в лабораторных условиях были предприняты попытки оценки термостойкости ШП, основанные на визуальном наблюдении. Были исследованы миграционные шунгиты месторождений Шуньга, Максово, Нигозеро, Чеболакша, а также большое количество образцов ШП других проявлений[4].

В настоящей работе в качестве примера приведены результаты изучения ТС проб ШП различных месторождений отличающихся, как по составу минеральной основы, так и по содержанию углерода (табл.1). Термическая стойкость определялась на кусковом материале. Средний размер образцов составлял 50х30х20 мм. Образцы с воздуха вносились в печь с определенной температурой. Время обработки – 30 мин. Образцы считались ТС, если в результате нагрева не разрушались. Одновременно с определением ТС определялась декрепитационная активность этих пород на декрепитографе Д-1 с автоматической записью в интервале 20 – 800⁰ С. Декрепитационный метод дает информацию о термическом разрушении породы в широком интервале температур [5].

Как показали исследования, наибольшей декрепитационной активностью обладает Ш-I и Ш-II (пр.3) месторождения Шуньга. Разрушение образцов пробы 3 начинается при 175 – 200⁰ С и сопровождается звуковым эффектом. Именно в этом температурном интервале находится максимум декрепитационной активности. На 1 г данной пробы приходится до 10³ – 10⁴ декрепитаций. Анализ декрепитационных кривых исследованных проб ШП указывает на наличие трех максимумов декрепитационной активности: I – в интервале температур 200-400⁰ С; II – 500 – 600⁰ С; III – выше 600⁰ С. Природа декрепитаций в разных температурных диапазонах, по-видимому, различна, при этом наблюдается разное термическое поведение породы в данных температурных диапазонах. Так, например, проба 7 при 400⁰ С была термостойкой, а при 600⁰ С разрушилась на куски пластинчатой формы.

Таблица 1

Термическая стойкость образцов шунгитовых пород разных месторождений

Проба	Содержание углерода, %	Температура обработки, °С					Характер разрушения
		400	600	900	1100	1300	
1-д. Часовенская	13.6	т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на куски неправильной формы
2-д. Тарутинская	29.2	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на пластинки (с треском)
3- Шуньга	53.5	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на пластинки (со взрывом)
4-лидит Шуньга	2.9	т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на несколько кусков
5-д. Никитинская	6.6	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на пластинки (с треском)
6-п. Толвуя	1.0	т.с.	т.с.	не т.с.	вспучил.	расплав.	на крупные куски
7-обнаж. Барыженцы	36.6	т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на куски пластинч. формы
8-обнаж. Барыженцы	30.0	т.с.	т.с.	не т.с.	не т.с.	не т.с.	на несколько кусков

Данные табл. 1 показывают, что большинство исследованных образцов были нетермостойкими. Осмотр образцов указывает на различия в характере их разрушения. Исходя из характера разрушения, все исследованные ШП были разделены на три группы – нетермостойкие, условно термостойкие и термостойкие. К первой отнесены пробы 2, 3, 5, 7. Остальные ко второй группе. Термостойких образцов из числа исследованных не оказалось. Следует отметить, что большинство исследованных образцов ШП м-я Загогино, разрушаются при термическом нагреве также на куски по форме, близкой к пластинчатой (рис.1).



Рис.1. Характер разрушения шунгитовой породы месторождения Загогино (т.о. при 400⁰С).

Образцы же ШП месторождения Максово в основной массе термостойкие, т.к. являются брекчированными, и развитие трещин, возникающих при нагреве, не получает развития, затухая на границе минеральных зерен.

Таблица 2

Термическая стойкость образцов шунгитовых пород одного месторождения

Месторождение	п.п.п.	Кол-во проб	Из них	
			тс	не т.с
Шуньга (Ш-I)	98.5	20	-	20
Шуньга (Ш-II)	69.7	20	-	20
Загогино	34.0	20	4	16
Березовец	32.1	23	5	18
Максово	30.2	13	10	3
Подсосонье	47.1	20	3	17

В табл.2 даны результаты исследования термостойкости большого количества проб, отобранных с разных мест одного месторождения. Температура обработки – 400⁰ С. Данные показывают, что поведение большинства проб одного и того же месторождения нестабильное, поэтому для сравнительной оценки, характеризующий термостойкость, необходим числовой показатель. Нами разработана методика определения показателя ТС, позволяющая на стадии добычи ШП, определять ее пригодность применения в том или ином термическом процессе. Существующий ГОСТ 7714-75 на угли каменные и антрацит для ШП в полной мере не приемлем, т.к. по минеральному составу они значительно отличаются от первых. Основными минералами ШП являются – кварц, слюды, полевые шпаты, хлориты и др. В качестве примесей часто встречаются разного рода сульфиды. Температурный диапазон дегидратации водосодержащих минералов, входящих в состав ШП, достаточно широк – от 200⁰ у иллита до 1100⁰ С, у флогопита. Учитывая тот факт, что ШП используются в высокотемпературных производствах, температура определения показателя ТС должна быть не ниже температурного интервала дегидратации минералов, входящих в состав ШП, т. е. не менее 1100⁰ С.

Предлагаемая методика определения ТС ШП состоит в следующем. Отбирается проба ШП массой не менее 15 кг. Отобранная проба просеивается на ситах с размером ячеек 50х50 и 25х25 мм. Проба фр.50-25 мм должна быть не менее 4 кг. Методом квартования отбирается проба 2 кг и высушивается при 100-105⁰ С в течение 2 ч. После охлаждения отбирают 4 навески по 0.5 кг каждая. Остаток оставляют на случай повторного определения. Подготовленные для испытаний пробы помещают в корундизовые тигли, предварительно нагретые в муфельной печи до 200-300⁰ С, закрывают огнеупорной крышкой, а затем помещают в печь. Температура обработки – 1100⁰С. Время обработки – 10 мин. с момента отключения печи после загрузки тиглей. Интенсивное разрушение ШП, как показали испытания, происходит в этот промежуток времени. После термической обработки охлажденные навески взвешивают с точностью до 1 г и обрабатывают в барабане с частотой вращения 50 об/мин в течение 2 мин., а затем рассеивают на сите с размером ячеек 15х15 мм.

За показатель термической стойкости (ПТС) принимают выход класса > 15 мм. ПТС в процентах вычисляют по формуле:

$$\text{ПТС} = \frac{M_1}{M} \times 100\%, \text{ где } M - \text{масса исходной навески;}$$

$$M_1 - \text{масса навески фр.}>15 \text{ мм}$$

По предложенной выше методике была произведена оценка ШП разного состава (табл.3).

Данные таблицы показывают, что ПТС шунгитовых пород варьирует в достаточно широких пределах – от 3 до 91%. Основными причинами столь разнообразного поведения ШП при термической обработке могут быть: слоистая структура водосодержащих минералов, входящих в состав породы, наличие свободного кварца и связанная с ним инверсия $\alpha \leftrightarrow \beta$ кварц, наличие нетермостойкого концентрированного углерода, текстурные особенности породы, значительное содержание сульфидов и ряд других причин [1,5]. На термическую стойкость ШП может оказывать влияние и различное распределение углерода в породе, а также их текстурные особенности. Основные формы распределения и их некоторые текстурные особенности показаны на рис 2.

Таблица 3

Показатель термической стойкости образцов шунгитовых пород (ПТС)

Проба	п.п.п.,%	Потери веса, %	ПТС, %	Характер разрушения
01	38.0	3.6	88	на куски неправильной формы
07	32.7	2.7	57	на куски неправильной формы
08	20.3	2.4	91	на куски по слоям породы
13	30.3	2.6	63	на куски по форме близкой к пластинчатой
30	30.1	3.3	79	на куски неправильной формы
33	31.6	3.3	33	на куски по форме близкой к пластинчатой
37	28.3	3.5	87	куски неправильной формы
38	31.8	3.0	83	на куски неправильной формы
45	34.6	2.5	41	на куски пластинчатой формы
48	29.7	2.6	83	на куски неправильной формы
Зажогоино (карьер, 10обр.) *	32.6	3.4	81	на куски неправильной формы или близкой к пластинчатой
Максово * (карьер, 10 обр.)	30.2	3.5	90	на куски неправильной формы
Шунгит-II* (м-е Шуньга, 10 обр.)	65.3	4.7	3	на мелкие пластинки

*даны средние значения.

Как правило, менее термостойкими являются породы с достаточно равномерным распределением углерода (рис.2а), а также содержащие отдельные включения концентрированного углерода (рис.2в). К термостойким можно отнести брекчированные породы (рис.2 б, г).

Условно все ШП было предложено разделить на три группы – термостойкие (ТС), условно термостойкие (УТС) и нетермостойкие (НТС). Количественная оценка ПТС также позволяет выделить те же три группы. К первой или ТС отнесены ШП с ПТС выше 80%, ко второй УТС с ПТС от 50 до 80%, остальные к НТС. Как показали исследования, ПТС можно увеличить в результате предварительной термообработки (ПТО). Температура ПТО может быть выбрана в результате декрепитационных данных. Она находится в диапазоне от 150-170 до 400° С и выше [1].

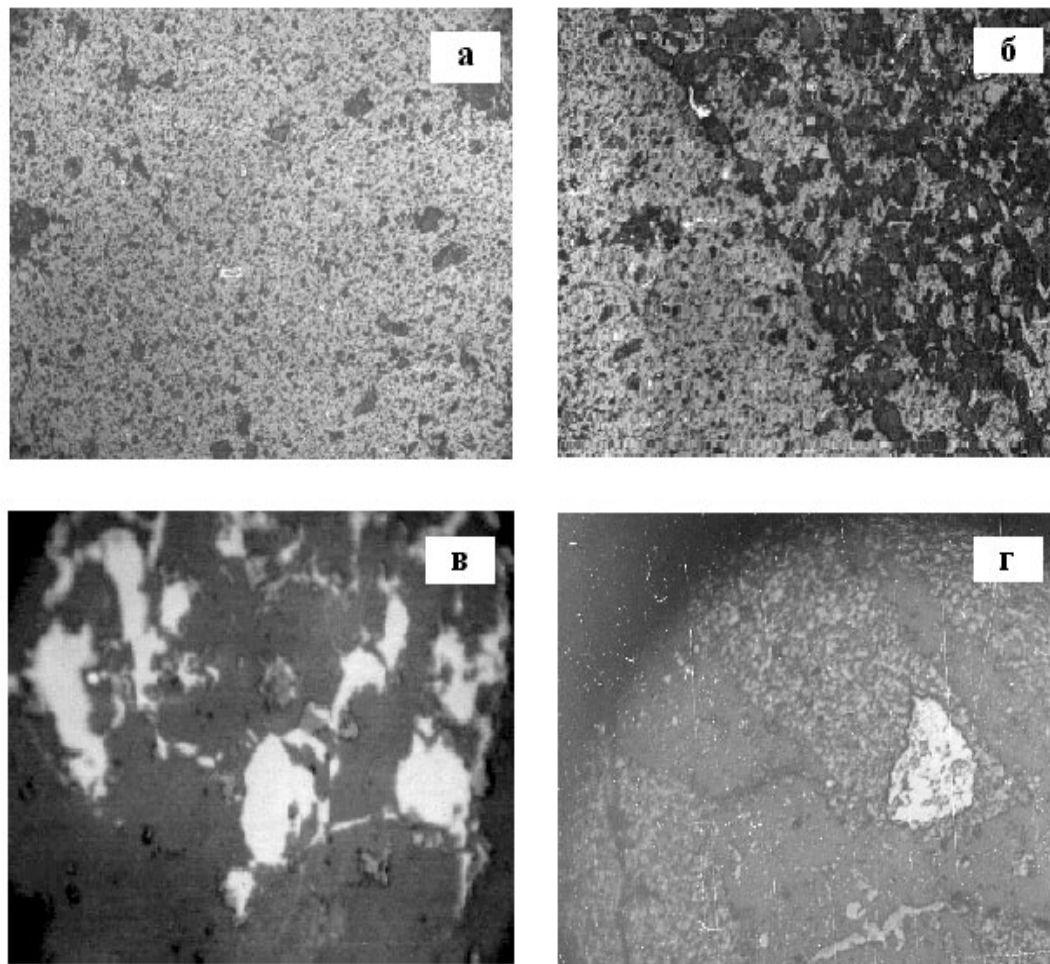


Рис. 2. Различные формы распределения углерода в шунгитовых породах:

а – 1-я форма (равномерное распределение); б – текстурные особенности 1-ой формы (равномерное и мозаичное); в – 3-я форма (однородные углеродные включения); г – 2-я форма в брекчированной породе. Увел. 48х.

Средний ПТС ШП разрабатываемых в настоящее время м-й Максово и Зажогоно находится в пределах 80-90%. ШП породы данных месторождений можно считать термически стойкими. Данные месторождения представляет собой настоящее время большой практический интерес, однако при использовании в термических производствах каждая партия поставляемого продукта должна обязательно подвергаться контролю на данный показатель.

Таким образом, предлагаемая методика определения количественного показателя термической стойкости шунгитовых пород проста и позволяет оценивать качество добытого сырья, не требуя сложного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кравченко В.А., Калинин Ю.К.. Некоторые направления использования шунгитовых пород. Сб. Шунгиты – новое углеродистое сырье. П-ск. 1984. – С.146-148.
2. Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования. П-ск. 1975. – С.146-149.
3. Отчет «Исследование возможности использования шунгитовых пород Ш разновидности при выплавке ферросилиция и силикомарганца взамен кварцита и кокса.
4. Запорожье.1973. – С.33.»

5. Калинин Ю.К., Тяганова В.И.. Исследование электропроводности и термостойкости шунгитовых пород. П-ск. 1974. – С.92-100.

6. Тяганова В.И.. Макроструктурные и текстурные особенности распределения углерода в шунгитовых породах. Сб. Геология и полезные ископаемые Карелии № 5. П-ск. 2002. – С.130-134.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ КУСКОВАТОСТИ (ФРУСТУМАЦИИ ИЛИ ОБРАЗОВАНИЯ «ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ») ГОРНЫХ ПОРОД

Поваренных М.Ю.¹, Бескин С.М.²

¹ОГЛ БЕН РАН, Москва, ²ИМГРЭ, Москва

В последние 15-20 лет после впечатляющих успехов физико-химического подхода к рассмотрению горных пород в духе классической термодинамики Гиббса и Коржинского в петрографии намечается возрождение интереса к их структурно-текстурным характеристикам, являющимся по своей сути отражением нелинейности, неравновесности и необратимости процессов их генезиса, для познания законов которых применимы идеи И.Р.Пригожина и его школы [1-3].

Эта тенденция вызвана, по нашему мнению, рядом факторов: 1) осознанием явной недостаточности аппарата равновесной термодинамики для объяснения реально наблюдаемых горнопородных явлений и привлечением для этого синергетических представлений и аппарата неравновесной термодинамики; 2) потребностями практики геологической разведки месторождений (особенно месторождений нефти и газа – в осадочных и метаморфогенных толщах) и инженерно-геологического прогнозирования устойчивости и долговечности инженерных сооружений в сейсмо- и экологически опасных регионах; 3) необходимостью перейти от словесного, часто субъективного и построенного на основании исследований в плоских срезах двумерного описания горных пород на трехмерную количественную основу; 4) потребностью создания *теории горной породы*, и на ее основе – фундаментальной науки петрологии и *естественной классификации горных пород*.

До последнего времени среди петрографов не существует общепризнанного определения понятия «горная порода», не говоря уже об основных классификационных понятиях «индивид» и «вид» горной породы [4-11]. В соответствии с главными геологическими процессами, приводящими к образованию горных пород, выделяются три их генетических класса: осадочные, магматические и метаморфические, которые в свою очередь подразделяются по минеральному, химическому, гранулометрическому, структурно-текстурному и другим признакам. В горном деле широко распространены классификации по какому-либо параметру, служащие для производственных целей: по пористости, объёмному весу, буримости, модулю упругости, электропроводности и др. Общей же универсальной классификации горных пород до сих пор не существует.

Петрографы при определении горной породы обычно ограничиваются описанием микроструктуры, микроскопической диагностикой слагающих её минералов и валовым химическим составом. Хотя хорошо известно, что такие *разные* горные породы, как гранит, аркозовый песчаник и гнейс могут иметь *одинаковый* валовый химический состав, а поле зрения поляризационного микроскопа зачастую оказывается меньше величины слагающих породу зерен. Кроме вышеназванных свойств горных пород, по нашему мнению, необходимо обратить пристальное внимание на их макроструктурные характеристики. Ф.Ю.Левинсон-Лессинг отмечал в 40-х годах нашего века: «Макрофизиография так же стара, как и геология горных пород. Умелое пользование макрофизиографией нашими предшественниками в домикроскопическую эру во многих случаях оставляет далеко за собой нас, переносящих все внимание на микроскоп и химический анализ, и поэтому часто пренебрегающих макрофизиографией» [12,13]. С.М.Бескин в своих работах по выработке номенклатуры редкометалльных гранитов понимал под ней особенности взаиморасположения кристаллов-зерен кварца и полевых шпатов (без детализации в первом приближении состава последних) в основной массе породы [11,14,15]. В результате совместных с В.Н.Лариным и Ю.Б.Мариным многолетних наблюдений и геологического картирования позднепротерозойских-фанерозойских гранитных массивов СССР установлено, что естественные ассоциации гранитных тел выделяются, в первую очередь, по физиографии основной ткани слагающих их пород (без учета порфировидных вкрапленников); причем принципиально различаются граниты трех физиографических типов А, Б и В, с которыми связаны совершенно определенные месторождения [16]. Приведем описание типизированных физиографий характерных образцов ведущих фаз гранитов этих типов. Тип А – неравнозернистый гранит с беспорядочным расположением зёрен кварца и полевых шпатов и низкой степенью агрегативности в расположении зёрен одноименных минералов (рис.1). Тип Б – равнозернистый гранит с цепочечно-агрегативным расположением субизометричных зёрен кварца, причем цепи последних окружают одноразмерные агрегаты и (или реже) одиночные кристаллы (рис.2). Тип В – равнозернистый гранит с «лапчато»-агрегативным и одиночным расположением изометричных зёрен кварца, причем приблизительно одноразмерные агрегаты последних (чаще по 2-6 зёрен) группируются в полевошпатовой массе примерно на одном и том же расстоянии друг от друга (рис.3).

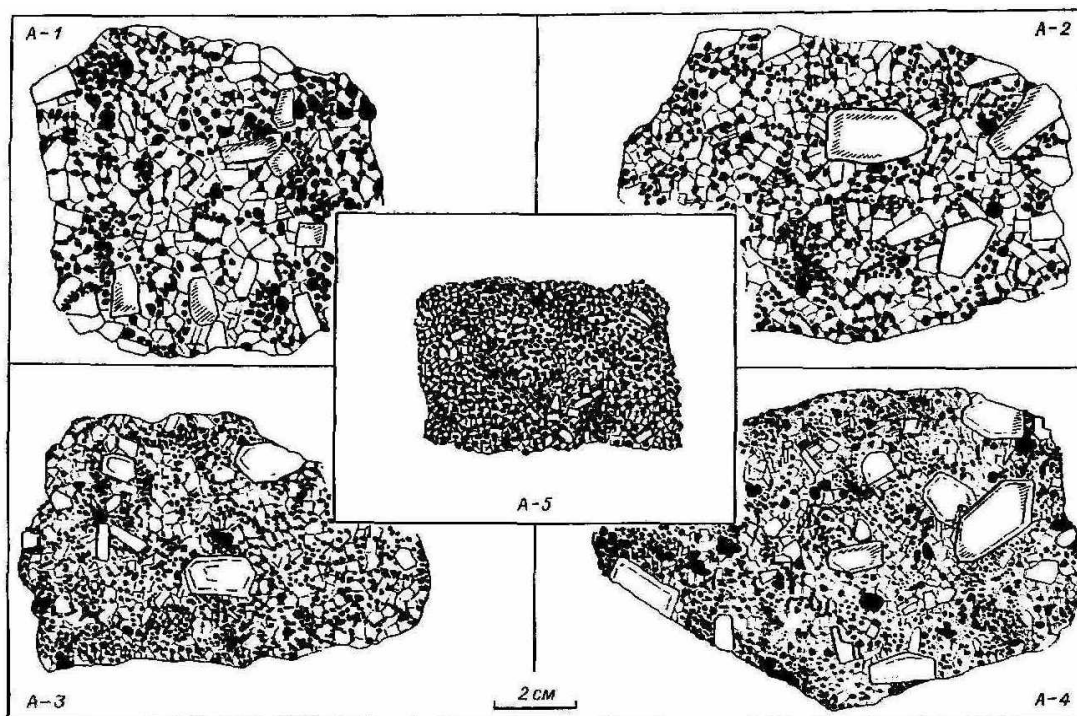


Рис.1. Типизированная физиография характерных образцов ведущих фаз гранитов типа А – неравнозернистый гранит с беспорядочным расположением зерен кварца и полевых шпатов (форма зерен условная) и низкой степенью агрегативности в расположении зёрен одноименных минералов. Черное – кварц, белое – полевые шпаты; слюды и амфиболы не изображены.

А-1 – крупнозернистый, А-2 – крупно-среднезернистый, А-3 – среднезернистый, А-4 – мелко-среднезернистый, неравномернозернистый, А-5 – мелко-среднезернистый, относительно равнозернистый

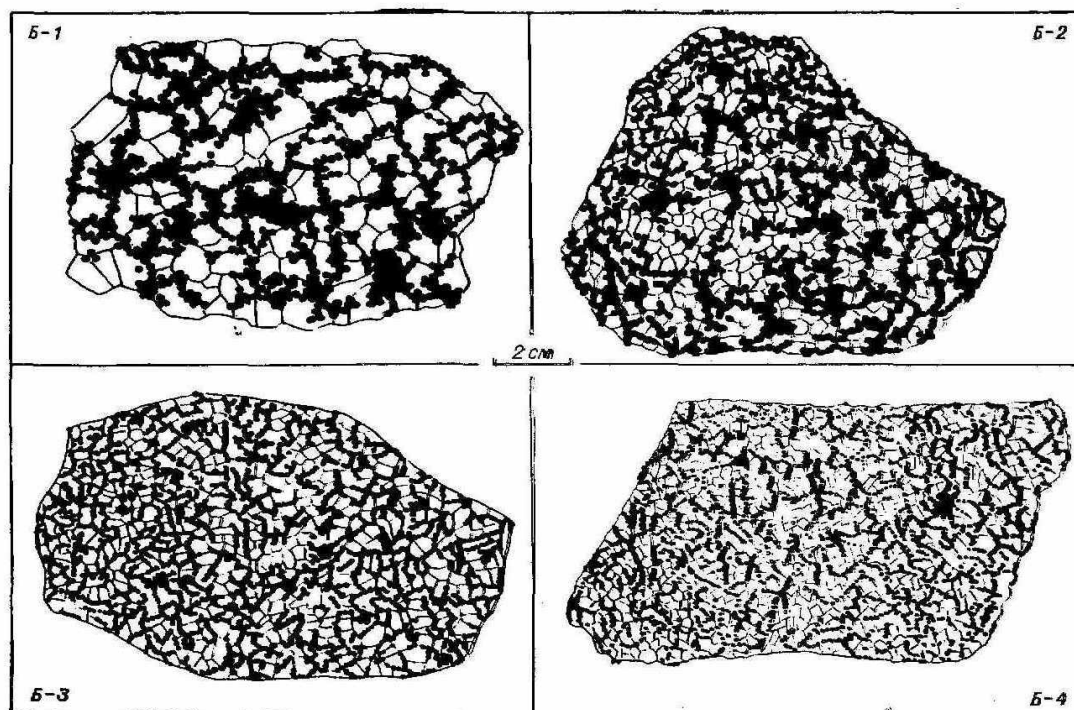


Рис.2. Типизированная физиография характерных образцов ведущих фаз гранитов типа Б – равнозернистый гранит с цепочно-агрегативным расположением субизометричных зерен кварца, причем цепи последних окружают однородные агрегаты и (или реже) одиночные кристаллы. Черное – кварц, белое – полевые шпаты (форма зерен полевого шпата условная); слюды и амфиболы не изображены. Гранит: Б-1 – крупнозернистый, Б-2 и Б-3 – среднезернистый, Б-4 – мелко-среднезернистый. Форма зерен полевого шпата

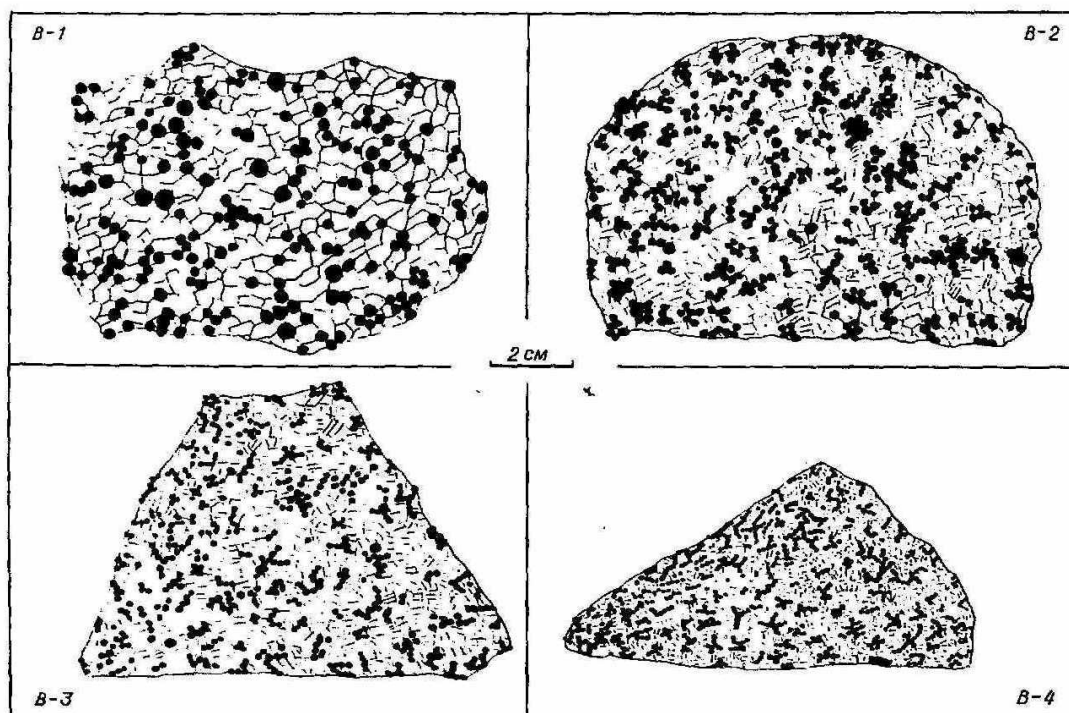


Рис. 3 Типизированная физиография характерных образцов ведущих фаз гранитов типа В.
 Черное – кварц, белое – полевые шпаты; слюды, амфиболы и пироксены не изображены. Гранит:
 В-1 – крупно-среднезернистый, В-2 – среднезернистый, В-3 – мелко-среднезернистый, В-4 – мелкозернистый гранит

Успешные попытки выделять типы гранитов по макрофизиографии делались в 60-е годы нашего века геологами Нигерии. Ими установлено, что рудоносные граниты Рей-филд Гона и Нгелл отличаются от нерудных серии Джос по взаиморасположению зёрен кварца в породе [17]. В.В.Потапьев при характеристике Орловского мезозойского гранитного плутона в Восточной Сибири отмечал две главные разновидности крупнозернистых пород: те, у которых сильно выражена склонность к образованию мономинеральных скоплений кварца вытянутой, ветвящейся формы, и те, у которых это проявлено в гораздо меньшей степени [18]. Типизация гранитов на основе их макрофизиографии и соответствующие принципы расчленения и картирования гранитоидных интрузий ныне являются общепризнанными и вошли в Методическую инструкцию по проведению Государственной геологической съемки масштаба 1 : 50 000 [19].

Важным для настоящего анализа свойств горных пород является то, что в понятие макрофизиографии гранитов вкладывают смысл, в какой-то степени аналогичный типу решётки кристаллов минералов [16]. На первый план выходит как бы структурная формула гранита, где «узлы решётки» выполнены кристаллическими зёрнами главных порообразующих минералов. В первом приближении разные типы гранитов являются по отношению друг к другу как бы полиморфными видами.

Метод аналогий и заимствование терминов и понятий из других наук широко распространен в научной практике. Однако, формальное перенесение приемов и методов изучения вещества с минерального уровня организации материи на горнопородный бывает не всегда оправдано. Многими геологами разделяется концепция уровневой организации геологических объектов, согласно которой объекты любого из уровней состоят непосредственно из объектов предыдущего ранга. Нам представляется методологически более обоснованной развивающаяся в последнее время концепция, согласно которой «... естественные системы образуются не объектами предыдущего ранга иерархии, а совокупностью элементарных ячеек» [8,20]. Для горной породы при сопоставлении ее с объектом предыдущего ранга (минерального) эта концепция также является более предпочтительной. Если для мономинеральной горной породы рассмотрение ее как совокупности более или менее одинаковых минеральных зёрен в качестве ее элементов выглядит на первый взгляд достаточно обоснованным (а нередко в литературе можно встретить предложение выделять элементарные ячейки горных пород по симметричному принципу расположения отдельных зёрен в терминах плотнейшей шаровой укладки, формально заимствованному из минералогии [7,21,22]), то уже для любой, даже самой простой полиминеральной породы никакое одно минеральное зерно не сможет характеризовать всю породу. В этом случае подлинным элементом (компонентом) породы или подсистемой объект-системы «горная порода» будет некий минимальный по размерам агрегат зёрен минералов – её «элементарная ячейка», тот кирпичик, «размножение» которого при помощи симметричных (или гомологических) операций будет достаточным для воспроизведения всей породы целиком [6-8].

Одним из первых подобная идея была высказана В.И.Драгуновым в 1971 году [8]. Правда, им тогда не были намечены основные задачи, которые вытекают из данного утверждения, главной из которых нам представляется задача визуализации (или выявления) элементарных ячеек в самых разнообразных горных породах. В статье нами показаны первые шаги по выявлению элементарных ячеек гранитов, а также ряда других горных пород.

Для гранитов А-, Б- и В-типов Р.Л.Бродской [21-24] с помощью интеграционных столиков и автоматических анализаторов изображений «MAGISCAN», «КВАНТИМЕТ – 720» и других рассчитывался следующий ряд количественных характеристик их строения: коэффициент агрегативности породообразующих минералов, идиоморфизм породообразующих минеральных индивидов, дисперсия гранулярного состава минеральных индивидов, количество границ между породообразующими минеральными индивидами, сбалансированных по атомарной плотности. В ряду гранитов А – Б – В первая и последняя характеристики возрастают, а вторая и третья – уменьшаются.

Группа под руководством Р.Л.Бродской в конце 80-х начале 90-х годов предприняла серию экспериментов, направленных на выявление пространственной регулярности, аналогичной кристаллической решётке в минералах, в гранитах и других горных породах с помощью дифракции субмиллиметрового радиоволнового излучения с длиной волны 2-4 мм [21-24]. Этим она продолжила серию работ группы Pincus конца 70-х начала 80-х годов, получивших нерасшифрованные дифракционные картины от тонкодисперсных глинистых пород (аргиллитов и алевролитов) при облучении их светом лазера. В ходе экспериментов Р.Л.Бродская наблюдала диффузные дифракционные картины от крупнозернистых гранитов и графических пегматитов, а затем и от гранитов лейкогранит-аляскитовой формации, письменных гранитов, кварцитов и амфиболитов, что либо указывало на наличие статистически значимого упорядочения зёрен этих пород по типу плотнейших упаковок, либо на существование «островков порядка» в неупорядоченном, бесструктурном окружении [25], либо, по нашему мнению, на имеющее место отражения от неких более крупных, упорядоченно расположенных структурных единиц породы. Вне всякого сомнения, полученный в ходе этих опытов результат чрезвычайно важен, однако, как нам представляется исходя из идеи поиска и визуализации элементарных ячеек горных пород, эти эксперименты необходимо продолжить, применяя излучения с длиной волны, хотя бы на 1-2 порядка (в зависимости от крупности зерен той или иной породы) превышающий тот, что был использован (т.е. не 2-4 мм, а хотя бы 30-500 мм). На чем основывается подобный прогноз?

Дело в том, что И.С.Делицин в 1985 году опубликовал монографию «Структурообразование кварцевых пород», посвященную исследованию верхнеюрских песков осадочного чехла Русской платформы, верхнепротерозойских кварцитовидных песчаников Украинского щита и архейских кварцитов Юго-Западного Прибайкалья [26]. При сопоставлении им узоров сводных диаграмм оптических ориентировок кварцевых зёрен в шлифах различного размера, построенных по данным изучения 10, 25, 50, 100, 200 и 400 зёрен, выяснилось, что уже на стадии рыхлых песков в них образуются некие устойчивые, статистически значимые агрегаты кварцевых зёрен с определённой оптической ориентировкой, наблюдаемой лишь в пределах 25-50 зёрен в шлифе (т.е. около **150 зёрен в объёме**), и ослабевающей по мере увеличения площади исследуемого шлифа (Рис. 4). В отличие от песков, для кварцитовидных песчаников устойчивая оптическая ориентировка не пропадала и при большей площади шлифа (около 200 зёрен), а для кварцитов она сохранялась при любом варьировании числе замеров (25 – 500), и кроме того – в любом сечении (чего не наблюдалось для песчаников). *Выявленные агрегаты взаимно-ориентированных кварцевых зёрен в мономинеральных кварцевых породах, по видимому можно рассматривать в качестве их элементарных ячеек.* (курсив наш – П.М.Ю и Б.С.М.). Но кроме того, в этих исследованиях был впервые обнаружен **нижний предел размеров элементарных ячеек** (курсив наш – П.М.Ю и Б.С.М.) изученных пород.

Регулярность (упорядоченность) расположения зёрен в мономинеральных кварцевых породах (кварцевых жилах разного происхождения и искусственных агрегатах, выращенных на кварцевой подложке) отмечали А.Н.Никитин и О.А.Сустанов [28-30].

В связи с вышеизложенным становится понятно, что если для мономинеральной кварцевой породы минимальный объем элементарной ячейки составляет около 150 зерен, то для любой полиминеральной породы он будет, по-видимому, значительно больше. При исследовании их пространственной регулярности с помощью субмиллиметрового излучения с длиной волны 2 мм и не следовало было ожидать какой-либо чёткой дифракционной картины, как и наблюдалось в опытах Р.Л.Бродской с мелко-среднезернистыми горными породами.

Эти выводы сопоставимы с результатами, полученными академиком М.А.Садовским и его коллегами по изучению гранулометрических анализов частиц торфа, песчано-гравелистой почвы, дроблёной взрывом горной породы и наблюдению спектров акустических колебаний горной породы [31-33]. Ими установлена *естественная кусковатость* (блочность) горной породы – существование «преимущественных» («фиксированных») размеров отдельностей, образующихся при её расчленении. Для уровня горной породы эти фиксированные размеры составляли 3-5, 20-25 и 450-500 мм. Любопытно, что эта иерархическая шкала кусковатости во многом совпадает с той, что была известна индуским натурфилософам согласно ведической Энциклопедии Абхидхармы [34-35].

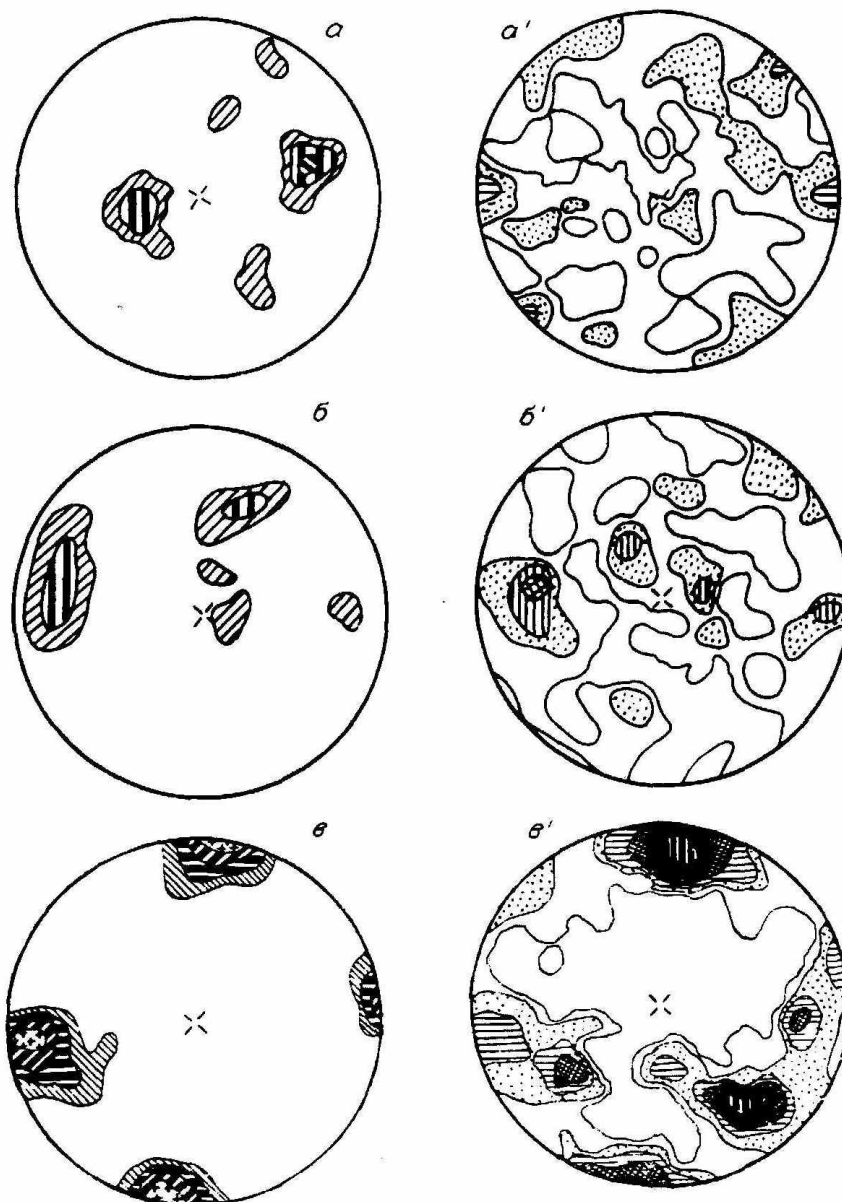


Рис.4 Сводные диаграммы оптических ориентировок кварцевых зёрен в песках (а, а'), песчаниках (б, б') и кварцитовидного песчаника (в, в')

а, б, в – местные диаграммы, построенные на основе 25 замеров, а', б', в' – местные диаграммы, построенные на основе 200 замеров (внутри изолиний плотность > 1%; плотность максимумов местных диаграмм – до 20%)

Очень важны в теоретическом аспекте работы В.В.Индутного и его коллег из ИГФМ (Украина) по структурной петрологии [36]. Ими отмечается необычная макрофизиография («каркасное строение») кальцифилов Завалья и карбонатитов Черниговской зоны Украинского щита (Приазовье), а также апатит-карбонат-магнетитовых руд Ковдорского месторождения (Кольский полуостров): «...каркасы пироксена и особенно магнетита существуют даже при небольших (15-30%) концентрациях этих минералов, а при ещё меньших концентрациях зерна магнетита образуют сродки по 3-5 индивидов, разбросанные в карбонатном агрегате в виде отдельных островков или цепочек. Одиночные зёрна магнетита встречаются редко». Подчеркнем, что наиболее ярко *каркасное* строение проявлялось при растворении штуфов карбонатитов Черниговской зоны и магнетитовых руд Ковдора в децинормальной соляной кислоте и почти полном удалении карбоната без разрушения структуры других минеральных фаз.

В этой связи следует отметить одну примечательную особенность темноцветных и рудных минералов в карбонатитах Черниговской зоны: удивительную скруглённость граней вплоть до появления почти шарообразных пироксенов, амфиболов, биотитов, пироксенов, колумбитов, цирконов, цериевых фергусонитов и образование немногих крупных скелетных кристаллов-реберников пироксена как свидетельство их роста на фоне растворения более мелких индивидов [37], то есть в резко неравновесных условиях.

В названной работе В.В.Индутного обращает на себя внимание явная схожесть его вывода о сущностном значении макрофизиографии для определения особенностей становления различных по генезису карбонатсодержащих горных пород, с выводами С.М.Бескина для гранитоидов. В.В.Индутный приблизился к визуализации и выявлению их элементарных ячеек (в качестве «оправдания» последнего может служить исключительная прочность и слаборастворимость гранитов в кислотах).

Проведенный анализ литературы и сопоставление наблюдений структурно-текстурных особенностей различных горных пород привели к выводу о существенном значении макрофизиографии при определении понятия «горная порода» и дали некоторое представление о её «первичных элементах» – **элементарных ячейках (фрустумах)** – от латинского фрустум – кусок). В качестве задач при разработке этой проблематики нами были выделены следующие: 1) визуализация (выявление) элементарных ячеек горных пород (фрустумов) с помощью различных методов (как альтернатива вышеуказанному дроблению взрывом, акустическому воздействию, растворению в кислоте, наблюдению в поляризованном свете, могут послужить такие методы как рентгеновская томография, генерация второй гармоники в нецентросимметричных минералах при лазерном облучении, люминесцентные методы, исследование ориентировки нематических жидких кристаллов на зёрнах ферромагнетиков [38] с использованием компьютерных возможностей; 2) определение основных характеристик фрустумов (размеров, формы, взаиморасположения зёрен различных минеральных фаз и др. с использованием анализаторов изображений [39-41]; 3) выяснение физических причин их образования (кроме возможных для некоторых вышеупомянутых пород: трибоэлектрической для кварцевых зёрен в песках и магнитной для зёрен магнетита в карбонатах; 4) установление характеристик заполнения пространства горно-породного тела элементарными ячейками (криволинейная симметрия Наливкина или гомология Михеева).

Фрустумация горных пород (свойство кусковатости, образования элементарных ячеек) была нами впервые выявлена при воздействии коротковолнового ультрафиолетового излучения (длина волны $\lambda=254$ нанометра) в нескольких образцах Каррарского статуарного мрамора и ещё в десятке образцов горных пород различного генезиса. Фрустумы были визуализированы в жёстком ультрафиолете в: 1) первично хемогенном, метаморфизованном мелко-среднезернистом равномерно-зернистом, просвечивающем, нетрещиноватом статуарном доломит-кальцитовом мраморе (Каррарское месторождение, Тоскана, Италия) и кальцитовом мраморе Кибик-Кордонского месторождения (Красноярский край, Россия); 2) магматогенном среднезернистом неравно-мернозернистом слабо-просвечивающем, слабо-трещиноватом кальцитовом безрудном карбонатите (Большектагнинское ниобиевое месторождение, Саян, Россия); 3) первично магматогенном аутометасоматически изменённом мелко-среднезернистом, равномерно-зернистом, нетрещиноватом амазонит-альбитовом редкометалльном граните, а также в крупнозернистом до пегматоидного облика, равномернозернистом, нетрещиноватом альбит-амазонитовом редкометалльном граните (Этыкинское танталовое месторождение, Забайкалье, Россия); 4) в метасоматическом крупнозернистом, просвечивающем, трещиноватом датолитовом скарне Дальнегорского месторождения (Приморье, Россия); 5) первично магматогенном гидротермально изменённом крупнозернистом, полупрозрачном, сильнотрещиноватом силицитовом ядре пегматита (Калба, Казахстан); 6) первично магматогенном аутометасоматически изменённом средне-мелкозернистом, равномернозернистом, нетрещиноватом щелочном редкометалльном граните Зашихинского тантало-ниобиевого месторождения (Восточная Сибирь, Россия); 7) крупнозернистом нетрещиноватом галите (Соликамское и Балтийское месторождения, Пермская и Калининградская области, Россия) [42-43].

Люминесцентные исследования были проведены с использованием ртутно-кварцевой лампы высокого давления СВД-120 ($\lambda=365$ нанометра) как источника возбуждения. Фрустумы в Каррарском мраморе, карбонатите из Большектагнинского месторождения и амазонит-альбитовом Этыкинском редкометалльном граните были визуализированы по ярко-голубому свечению люминесценции с полосой в районе 490 нм, которое может быть приписано (по Gotze et al., 1999) [44] излучению кислородных комплексов. Интенсивность люминесценции в соседних фрустумах (тёмно-фиолетового цвета) в этих образцах горных пород была в 2-3 раза меньше, чем у фрустумов, визуализированных по ярко-голубому свечению. Фрустум в крупнозернистом датолитовом скарне Дальнегорского месторождения визуализирован по светло-жёлтому свечению люминесценции двухвалентного европия с полосой в районе 445 нанометра и трёхвалентного церия с двумя полосами в районе 350 и 370 нанометров.

Характерные размеры и форма фрустумов в исследованных горных породах существенно различаются. Наименьшие по числу их составляющих минеральных зёрен фрустумы из мономинеральных горных пород – датолитового скарна, силицитового кварцевого ядра пегматита, галита и статуарного мрамора: около 25-50 зёрен в сечении ($1-2 \text{ см}^2$) и около 125-300 зёрен в объёме. Фрустумы в кальцитовом карбонатите содержат 50-70 зёрен кальцита в срезе ($2-3 \text{ см}^2$) и около 300-450 зёрен в объёме. Около 300-500 минеральных зёрен содержат фрустумы из щелочного гранита (в срезе $3-4 \text{ см}^2$ или около 1000-1500 зёрен в объёме). Самые крупные фрустумы также зафиксированы в полиминеральных горных породах – амазонит-альбитовом и пегматоидном альбит-амазонитовом гранитах, и содержат более 1500 минеральных зёрен калиевого полевого шпата, кварца, альбита, литиевой слюды и аксессуарных колумбит-танталита и циркона в срезе ($6-10 \text{ см}^2$) и более 5000-6000 зёрен в объёме.

Отмечено, что наложенные процессы (амазонитизация, альбитизация и окварцевание в гранитах, развитие рудной минерализации – пирохлора и торита – в щелочном граните) наследуют границы фрустумов в качестве *ослабленных зон* в горных породах и в какой-то степени подчёркивают их своим преимущественным распространением.

Морфология фрустумов («элементарных ячеек» горных пород) в исследованных образцах весьма прихотливая, и для ее описания, возможно, придется применять теорию фракталов [45-55].

Подход к решению с неизбежностью возникающих при описании фрустумации горных пород симметричных задач и выявления закономерностей их пространственного расположения (выполнения горнопородного тела) намечается через использование 11 возможных сеток Кеплера-Шубникова-Делоне и 28 разбиений пространства Андреини [56].

ЛИТЕРАТУРА

1. *G.Nicolis, I.Prigogine*. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order Through Fluctuations. New York: J.Wiley&Sons. 1977; A la recontre du complexe. Paris: PUF. 1992.
2. *W.Ebeling, A.Engel, R.Feistel*. Physik der Evolutionsprozesse. Berlin: Akademie-Verlag. 1990.
3. *E.Karpov, G.Ordonez, T.Petrosky, I.Prigogine*. Microscopic Entropy and Nonlocality. Proc. Workshop on Quantum Physics and Communication (QPC 2002). Dubna, Russia. 2002.
4. *Белоусов А.Ф.* К общей концепции горной породы. Препринт ИГИГ СО АН СССР. 1987. Вып. 4. – С. 1-52.
5. *Белоусов А.Ф.* Структурный контроль в геогенезе. Препринт. Новосибирск: ОИГГМ СО АН СССР. 1991. Вып. 10. – 52 с.
6. *Васильев В.И., Драгунов В.И., Рундквист Д.В.* «Парагенезис минералов» и «формация» в ряду образований различных уровней организации // Зап. ВМО. 1972. Часть CI. Вып. 3. – С. 281-289.
7. Геологические тела (терминологический справочник). Под ред. Ю.А.Косыгина, В.А.Кулындышева, В.А.Соловьева. М.: Недра. 1986. – С. 38.
8. *Драгунов В.И.* Онтологические аспекты геологии // В кн.: Проблемы развития советской геологии (Тр. ВСЕГЕИ. Нов. серия. Т.177). Л. 1971. С. 48-69.
9. *Поваренных М.Ю.* О пространственной регулярности («элементарной ячейке») горных пород // Биохим. карбонаты антропоген. озер и источников. Пермь. 1989. – С. 138-151.
10. *Попов В.А.* К морфологическому анализу структур минеральных агрегатов // Сб.: Проблемы онтогенеза минералов. Л.: Наука. 1985. – С. 46-60.
11. *Рундквист Д.В.* Предисловие // Кн.: Минералы и парагенезисы минералов горных пород. 1973. Л.: Наука. – С. 4-6.
12. *Левинсон-Лессинг Ф.Ю.* Введение в историю петрографии. Л.: ОНТИ. 1936. – 136 с.
13. *Федоров Е.С.* О новой группе изверженных пород // Изв. Моск. сельско-хоз. ин-та. 1896. Т. II. Кн.1. – С. 168-187.
14. *Бескин С.М.* К проблеме номенклатуры и формационно-металлогенической типизации гранитов // Методические аспекты изучения редкометалльных месторождений. М.:Наука. 1981. – С. 38-53.
15. *Бескин С.М., Ларин В.Н., Марин Ю.Б.* Редкометалльные гранитовые формации. Л.:Недра. 1979. – 280 с.
16. *Beskin S.M., Larin V.N., Marin Yu.B.* Physiographic types of granitic rocks of Kazakhstan and their metallogenetic significance // Granite-related ore deposits of Central Kazakhstan and adjacent areas. INTAS-93-1783 Project. St.Petersburg. 1996. PP. 259-268.
17. Геология месторождений редких элементов. М.:Госгеолтехиздат. 1958. N.2. – 49 с.
18. *Потапов В.В.* Внутреннее строение и рудоносность мезозойского гранитного массива // Гранитоидные массивы Сибири и оруденение. Новосибирск:Наука. 1971. – С. 5-88.
19. Принципы расчленения и картирования гранитоидных интрузий. Методические рекомендации. Л.: МинГео СССР, ВСЕГЕИ. 1988. – 61 с.
20. *Зубков И.Ф.* Геологическая форма движения материи. М.: Наука. 1979. – 120 с.
21. *Бродская Р.Л., Марин Ю.Б.* Использование стереометрических методов в онтогеническом анализе горных пород // ЗВМО. 1979. Вып.2. Ч.108. – С. 141-153.
22. *Бродская Р.Л.* Онтогенический анализ магматических горных пород // Минерал. журнал. 1989. Вып. 5. – С. 3-10.
23. *Бродская Р.Л.* Формирование и эволюция структуры редкометалльных гранитов // Изв. ВУЗов. Геол. и разведка. 1990. Вып.8. – С. 45-51.
24. *Бродская Р.Л., Е.А.Виноградов, В.И.Голованов, Н.А.Ирисова, В.А.Черепанов.* Обнаружение пространственной периодичности в структуре горных пород методами дифракции и радиовидения // Препринт 19. Ин-т Общей физики АН СССР. М. 1991. – 7 с.
25. *Войтеховский Ю.Л.* О принципах организации горных пород и инвариантах квадратичных форм // ДАН СССР. 1994. Т. 338. Вып.3. – С.355-357.
26. *Делицин И.С.* Структурообразование кварцевых пород. М.: Наука. 1985. – 191 с.
27. *Делицин И.С.* Элементарная ячейка горных пород и механизм их самоорганизации // Идея развития в геологии: Вещественный и структурный аспекты. Новосибирск. 1990. – С. 273-280.
28. *Никитин А.Н.* Образование пьезоэлектрических текстур в кварцосодержащих горных породах // Физика Земли. – 1996. Т.10. – С. 15-21.
29. *Никитин А.Н., Иванкина Т.И.* Нейтронография в науках о Земле // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2004. Т. 35. Вып. 2 – С. 349 – 407.
30. *Сустапов О.А.* Зарождение и рост индивидов в друзьях расщепленного кварца (Восточная Якутия) // ЗРМО. – 2005. № 5. – С. 94-103.

31. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // ДАН СССР. 1979. Т.247. Вып. 4. – С. 829-831.
32. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. О свойствах дискретности горных пород // Препринт ИФЗ АН СССР. 1981. Вып. 1. – С. 15-28.
33. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды // Вестник АН СССР. 1983. Вып. 1. – С. 82-88.
34. Поваренных М.Ю. Минералогия на грани смены парадигмы // Новые идеи и концепции в минералогии: Материалы III Международного минералогического семинара. Сыктывкар: Геопринт. 2002. 288 с. – С. 14-18.
35. Васубандху. Абхидхармокоша (Энциклопедия Абхидхармы). Учение о мире. – СПб.: Андреев и сыновья. – 1994. – С. 179.
36. Индутьный В.В., Кулик Д.А. Пространственное строение минеральных фаз в горных породах // Доклады АН УССР. 1982. Вып.10. – С.10-13.
37. Поваренных М.Ю. Новые данные о некоторых редкометалльных минералах из карбонатитов Черниговской зоны // Новые данные о минералах. М.: Наука. 1985. N 32. – С. 82-90.
38. Иванюк Г.Ю. Магнетит железистых кварцитов Кольского полуострова. Автореферат на соиск. уч. ст. канд. г.-м.наук. 1992. СПб. – 17 с.
39. Гайдукова В.С., Данильченко А.Я., Сидоренко Г.А. Количественный минералогический анализ на современном этапе его развития // Сов. геол. 1989. Вып.2. – С.74-83.
40. Гайдукова В.С., Шурига Т.Н., Голубничий В.В., Чекинова О.О. Пример использования автоматического оптико-геометрического метода при изучении редкометалльных метасоматитов // Сб. тез. докл.: Прикладные и экологические аспекты минералогии. 1991. Кн. 2. М.: МО ВМО. – С. 158-160.
41. Гайдукова В.С., Могилевкин С.Б., Лапшин А.М., Голубничий В.В., Чекинова О.О. Исследование лейкократовых гранитов Южного Казахстана с помощью оптико-геометрического метода // Сб. тез. докл.: Прикладные и экологические аспекты минералогии. 1991. Кн. 2. М.: МО ВМО. – С. 160-161.
42. Поваренных М.Ю. Фрустумация (фрагментация, кусковатость, образование «элементарной ячейки») – впервые выявленное свойство горных пород // Теория, история, философия и практика минералогии. Материалы IV Международного минералогического семинара. Сыктывкар, 2006. 328 с. – С. 66-67.
43. Поваренных М.Ю. Переход от зёренного к ансамблевому (агрегативному, фрустумационному) представлению горных пород // Материалы Международной научной конференции «Фёдоровская сессия-2006». СПб 2006. 217 с. – С. 35-37.
44. Gotze J., Plotze D., Fuchs H., Habermann D. Defect structure and luminescence behaviour of agate – results of electron paramagnetic resonance (EPR) and cathodoluminescence (CL) studies // Miner. Mag. 1999. V. 63. P. 149-163.
45. Barnsley M. Fractals everywhere. Academic Press. Inc. 1988. 51 p.
46. Carlson W.D., Denison C., Ketcham R.A. Controls on the nucleation and growth of porphyroblasts: kinetics from natural textures and numerical models // Geol. Journal. 1995. V. 30. PP. 207-225.
47. Fowler A.D. Self-organized mineral textures of igneous rocks: the fractal approach // Earth Sci. Reviews. 1990. 29. PP. 47-55.
48. Friesen W.I., Mikula R.J. Fractal dimensions of coal particles // J/ Colloid Interface Sci. 1987. 120. PP. 263 -271.
49. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of Nature. San-Francisco: Freeman. 1982. – 461 p.
50. Thompson A.H. Fractals in rock physics // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1991. 19. PP. 237-262.
51. Wong Po-zen, Howard J. Surface roughening and fractal nature of rocks // Physical Review Letters. 1986. V. 57. N 5. PP. 637-640.
52. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир. – 1991. – 258 с.
53. Пономарёв В.С. Структуры самопроизвольного разрушения в горных породах // Изучение тектонических деформаций. – М.: ГИН АН СССР. – 1987. – С. 117-136.
54. Сергеев В.Н. Информативность минеральных индивидов и агрегатов в структурно-генетических анализах кристаллических комплексов // Структурные парагенезы и их ансамбли. Материалы IV Всероссийского симпозиума по экспериментальной тектонике и структурной геологии. – М.: ГЕОС. – 1997. 282 с. – С. 152-154.
55. Шумков С.И., Бунин И.Ж., Терехова С.Е., Зверев И.В., Долгова М.О. Фрактальная природа процесса дезинтеграции частиц угля при взаимодействии с метаногенной ассоциацией микроорганизмов // Докл. АН России. – 1998. Т. 360. № 5. – С. 652-654.
56. Галушин Р.В. Геометрические аспекты кристаллообразования // Кристаллография. 1998. Т. 43. N 2. – С. 366-374.

ВЛИЯНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

О.В. Мясникова

Институту геологии, Карельский научный центр РАН

В последнее время уделяется большое внимание вопросам типоморфизма основных породообразующих минералов с целью выявления генетических особенностей пород и возможности использования этих данных при поисках и предварительной оценке месторождений полезных ископаемых.

По физической сущности типоморфные особенности минералов делятся на четыре группы [1]:

1. Конституционные типоморфные признаки (типоморфизм конституции минералов): химические; структурные.

2. Морфологические типоморфные признаки (типоморфизм морфологии минералов): облик кристаллических индивидов; рельеф на гранях кристаллов; характер поверхности зерен.

3. Типоморфные включения минералообразующей среды: газожидкие включения; включения бывшего расплава; твердые включения.

4. Типоморфизм физических свойств минералов: оптические; люминесцентные; электрические; термические; механические.

Как правило, неметаллические полезные ископаемые, используемые в качестве строительных облицовочных материалов, представляют собой полиминеральные системы, физико-механические свойства которых зависят от эндогенных условий образования и последующих экзогенных и техногенных процессов на протяжении всего периода существования.

Цель данного исследования - объяснить, основываясь на типоморфных особенностях основных породообразующих минералов физико-механические свойства природного камня, на примере месторождений гранита.

Для изучения были выбраны месторождения различных формационных типов гранита в Северной Карелии - Летнереченское и Калгувара, в Центральной Карелии - Кашина Гора и в Юго-Западной Карелии - Сулку.

Граниты месторождения Летнереченское (табл.1 - №1) представляют собой мелкозернистые породы, имеющие розоватую до светло красных оттенков окраску основного матрикса. Главные породообразующие минералы: микроклин - 36%, плагиоклаз - 25%, кварц - 33%. Характерными особенностями являются преобладание калиевого полевого шпата над плагиоклазом, высокое содержание кварца и незначительное количество темноцветных минералов. Калиевый полевой шпат представлен микроклином, зерна имеют таблитчатые и полигональные очертания с ровными, иногда ступенчатыми границами, что характерно для начальной стадии дробления породы (процесс катаклаза). Кварц развит в виде зерен ксеноморфных очертаний, округлой и овальной формы, а также более крупных бласт изометричной формы с извилистыми краями. Плагиоклаз представлен зернами таблитчатой, удлиненной и изометричной формы, границы зерен ровные, слегка угловатые; часть зерен содержит мелкодисперсные зерна серицита и включения кварца в виде единичных гранул. Структура гранитов гипидиоморфнозернистая.

Месторождение Калгувара (табл.1 - №2) сложено среднезернистыми до крупнозернистыми гранитами нормального ряда, представляющими собой сильно метаморфизованную породу, в которой наблюдаются процессы частичного плавления - мирмекиты, в которых кварц представлен как продукт реакции при замещении калиевого полевого шпата плагиоклазом. Граниты имеют розово-красную окраску с полосчатостью, обусловленной ориентированным расположением чешуек биотита. Главные породообразующие минералы: плагиоклаз - 34%, микроклин - 32%, кварц - 25%. Характерной особенностью является наличие в калиевом полевоом шпате (микроклине) пертитовых вростков. В результате незначительных вторичных изменений в микроклине развиваются пелитовые частицы. Плагиоклаз образует крупные идиоморфные зерна таблитчатой, иногда изометричной формы, серицитизация проявлена незначительно. Кварц представлен зернами с изометричными, иногда бухтообразными очертаниями. Структура гранитов гранобластовая.

Породы месторождения Кашина Гора представлены среднезернистыми, местами крупнозернистыми плагиогранитами (табл.1- №3), с порфировой структурой. Главные породообразующие минералы: плагиоклаз - 47%, кварц - 28%, микроклин - 22%. По внешнему виду породы отличаются от нормальных гранитов более темной окраской коричневатых оттенков. В качестве порфировых вкрапленников представлены таблитчатые зерна микроклина на фоне равномернозернистой гипидиоморфнозернистой основной массы, сложенной таблитчатыми зернами плагиоклаза и неправильными, реже округлыми зернами кварца. Характерной особенностью гранитов является отсутствие вторичных изменений.

Месторождение Сулку сложено мелкозернистыми плагиогранитами (табл.1 - №4), в которых среди гранобластовой основной массы наблюдаются участки порфиробластовой структуры. Главные породообразующие минералы: плагиоклаз - 50%, кварц - 27%, микроклин - 12%, биотит - 8% (18,5%). Характерной особенностью гранитов является наличие параллельно ориентированных линзовидных зерен кварца, обуславливающих гнейсовидность гранитов, а также значительное содержание биотита. Плагиоклаз представлен зернами таблитчатой формы, реже тонкими лейстами с ровными, иногда извилистыми границами. Зерна пелитизированы, более крупные иногда содержат микровключения серицита игольчатой формы и кварца округлой и овальной формы. Кварц образует мелкие изометричные зерна с ровными границами, а также крупные, часто вытянутые бласты с извилистыми границами. Микроклин представлен в виде ксеноморфных зерен с неровными краями, а также в виде порфиробласт таблитчатой формы. Биотит развит в виде вытянутых тонкопризматических, реже таблитчатых зерен, иногда частично или полностью замещается хлоритом.

По химическому составу исследуемые граниты относятся к породам, пересыщенным кремнекислотой: ее содержание в нормальных гранитах (2) составляет 70-72%, в плагиогранитах (3, 4) содержание SiO_2 несколько снижается до 69-70% и в щелочных гранитах (1) - соответствует 73%. Высокое содержание TiO_2 и $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ (рис. 1а и 1б) в гранитах нормального ряда и щелочных гранитах связано с наличием в их составе таких акцессорных минералов как сфен, титаномagnetит, ортит, рутил. Повышенное содержание TiO_2 в пла-

гигранитах (3), месторождения Кашина Гора, обусловлено лейкоксомом и титаномангнетитом. Увеличение доли слюд, особенно мусковита приводит к повышенному содержанию глинозема в плагиогранитах до 16% (рис.1в) по сравнению с 13% у нормальных и щелочных гранитов. Повышенное содержание СаО в плагиогранитах (3) обусловлено увеличением доли плагиоклаза до 50 мас. % и цветных минералов, что подтверждается на диаграмме (рис.1г). Для всех исследуемых гранитов суммарное содержание щелочей составляет 7-8%. Снижение отношения К/Na в плагиогранитах (рис. 1д) обусловлено понижением содержания в них микроклина по сравнению с нормальными и щелочными гранитами.

На данных месторождениях были отобраны представительские пробы и определены основные физико-механические свойства, регламентирующие качество данных пород как облицовочного и строительного материала. Результаты приведены в табл.1 и на рисунке 2.

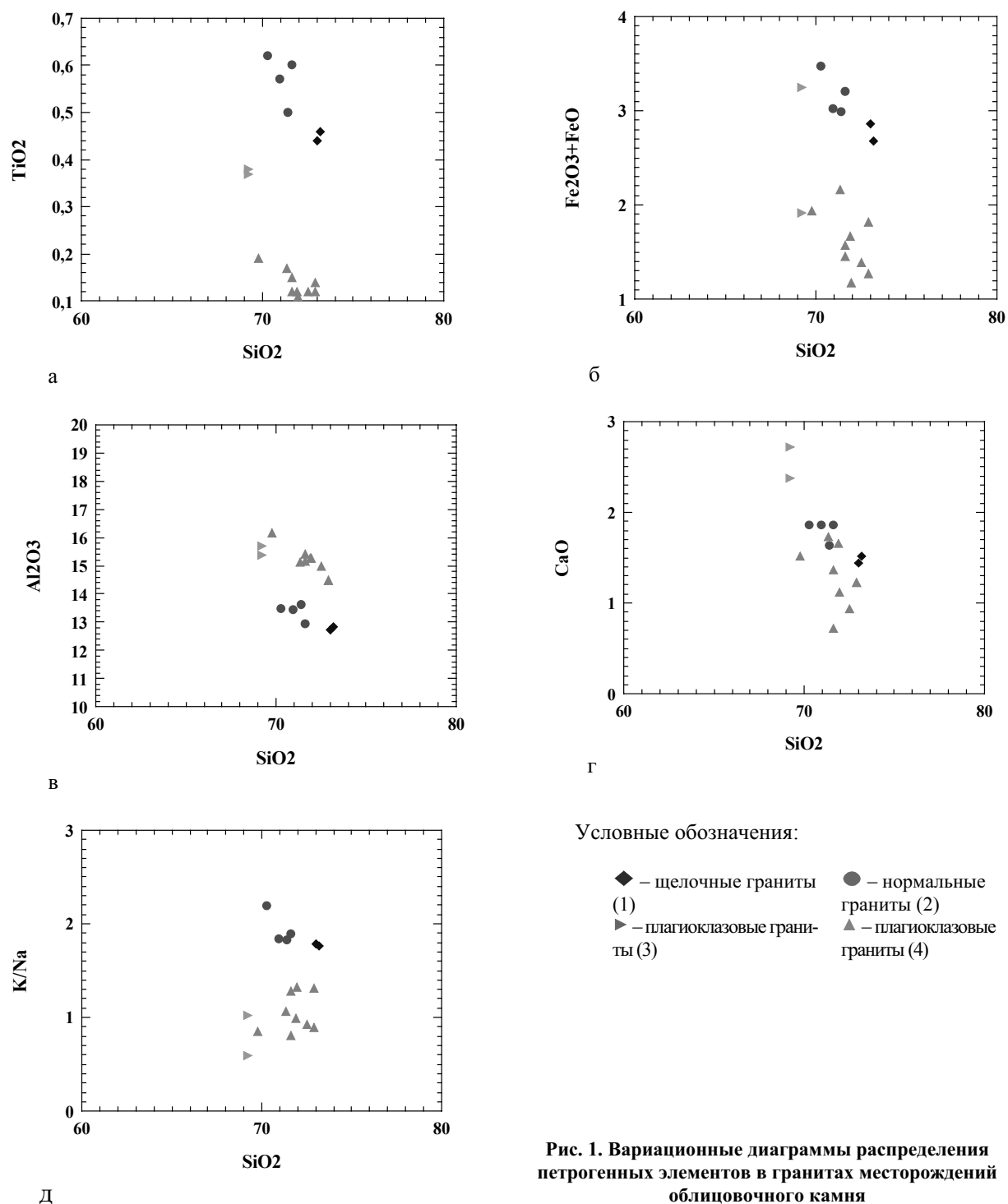


Рис. 1. Вариационные диаграммы распределения петрогенных элементов в гранитах месторождений облицовочного камня

Характеристика месторождений гранита

№	Тип горной породы	Структура	Главные породообразующие минералы			Прочность при одноосном сжатии в сухом состоянии, МПа	Средняя плотность, кг/м³	Водопоглощение, %	Эффективная пористость, %	Общая пористость, %
			Содержание, %							
			Форма зерен							
1	Микроклиновые граниты	Гипидиоморфнозернистая	Микроклин	Таблитчатая; полигональная; границы ровные, иногда ступенчатые.	36	$\frac{121-138}{131}$	2660	0,25	0,67	1,76
			Плагиоклаз	Таблитчатая; удлиненная; изометричная; границы ровные, слегка угловатые.	25					
			Кварц	Округлая; овальная; изометричная с закругленными углами, иногда извилистыми краями.	33					
2	Нормальные граниты (щелочноземельные)	Гранобластовая	Плагиоклаз	Таблитчатая, иногда изометричная.	34	$\frac{147-190}{151}$	2660	0,33	0,88	2,39
			Микроклин	Таблитчатая.	32					
			Кварц	Изометричная, иногда бухтообразная.	25					
3	Плагиогранит	Порфировая	Плагиоклаз	Таблитчатая.	47	$\frac{142-211}{177}$	2690	0,15	0,40	0,74
			Кварц	Неправильная, реже округлая.	28					
			Микроклин	Таблитчатая.	22					
4	Плагиогранит	Гранобластовая с участками порфировой	Плагиоклаз	Таблитчатая, реже тонкие лейсты; границы ровные, иногда извилистые.	50	$\frac{160-175}{168}$	2680	0,27	0,72	1,02
			Кварц	Изометричная, таблитчатая; границы ровные, в крупных зернах извилистые.	27					
			Микроклин	Ксеноморфная с неровными границами; таблитчатые.	12					
			Биотит	Тонкопризматическая, реже таблитчатая.	8 (18,5)					

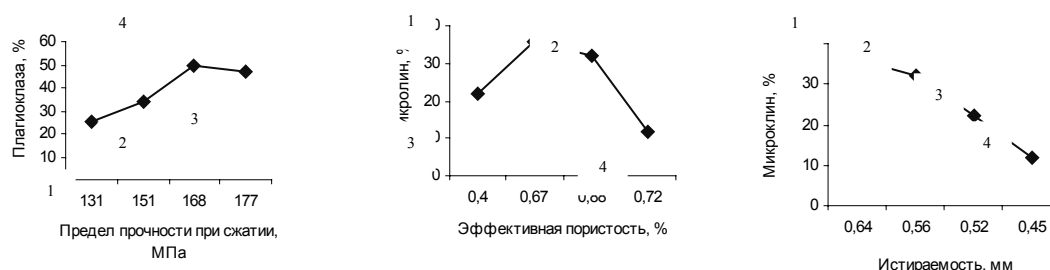


Рис.2. Зависимость физико-механических свойств от минерального состава гранита

По результатам анализа взаимосвязей минерального состава и структуры с физико-механическими свойствами гранита можно сделать следующие выводы:

Прослеживается зависимость предела прочности при одноосном сжатии от состава и содержания в гранитах полевого шпата, чем больше содержание плагиоклаза, тем выше значение прочности при одноосном сжатии. Увеличение содержания микроклина приводит к снижению прочности породы при одноосном сжатии и механической прочности – истираемости (рис.2). Микроклин, обладая совершенной спайностью в двух направлениях почти под прямым углом, легко подвергается деформациям в процессах катакlastического метаморфизма, выражающегося в ступенчатости границ зерен на начальных стадиях дробления. Кроме того, типоморфной особенностью микроклина является его способность к формированию полисинтетических двойников по двум взаимно перпендикулярным направлениям, что обуславливает образование так называемой микроклиновой решетки. [2]. Двойниковые швы в данном случае представляют собой ослабленную зону. Значительное содержание такого минерала в горной породе, при экзогенном и техногенном воздействии будет способствовать накоплению и развитию в ней различных дефектов, ухудшающих физико-механические свойства породы.

Водопоглощение и эффективная пористость, характеризующие наличие открытых дефектов в горной породе, имеют самые низкие показатели у плагиогранитов с порфировой структурой (таблица 1 - №3). Хотя порфировая структура – это неравномернотекстурированная структура, тем не менее, у данной разновидности гранита незначительные различия в крупности зерен минералов: порфировые включения представлены таблитчатыми зернами микроклина 1-3 мм, редко 6-8 мм; на фоне гипидиоморфнотекстурированной основной массы, сложенной таблитчатыми зернами плагиоклаза 2-3 мм и неправильной, реже округлой формы зернами кварца 1-3 мм. Отсутствие вторичных изменений, минеральные и структурные особенности обеспечили низкие показатели эффективной пористости и высокое значение предела прочности при сжатии.

Для плагиогранитов (таблица 1 - №4) высокие значения водопоглощения и эффективной пористости связаны с присутствием среди гранобластовой основной массы участков порфиробластовой структуры, где около порфиробластов могут наблюдаться отодвигания, раздвигания и изгибания минералов или структурных элементов основной ткани под влиянием роста порфиробластов (кварца, иногда микроклина) [3]. Большое содержание (8-18%) и неравномерное распределение биотита в породе, обладающего совершенной спайностью и низкой твердостью, является дополнительным источником ослабления породы.

Высокие значения водопоглощения и эффективной пористости в мелкозернистых микроклиновых гранитах с гипидиоморфнотекстурированной структурой, (табл. 1 - № 1) очевидно связаны с большим содержанием и наличием микродефектов в микроклине.

Средняя плотность гранитов напрямую зависит от состава, типоморфных особенностей и содержания главных породообразующих минералов, и от присутствия темноцветных минералов.

Более плотными являются граниты с большим процентным содержанием натриево-кальциевых полевых шпатов в составе и присутствием темноцветных минералов.

Таким образом, изучая минералогический и химический состав гранитов, учитывая их структурно-текстурные особенности, можно косвенно оценить физико-механические свойства неметаллических полезных ископаемых на стадии предварительной оценки месторождений на облицовочный камень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е.К. Лазаренко, В.И. Павлишин, В.С. Мельников. Теоретические основы учения о типоморфизме минералов. – В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980.
2. Г.М. Саранчина. Породообразующие минералы. С-П. Университет, 1998. – 155 с..
3. Ю.И. Половинкина. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических горных пород. Часть первая. М.: Недра, 1966. – 237 с.

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СЫРЬЯ ДЛЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г.А.Лебедева, Г.П.Озерова

Институт геологии КарНЦ РАН

К базальтовым технологиям относятся производства каменного литья и минеральной ваты из расплавов горных пород основного-ультраосновного состава (базальтов, диабазов, габбро-диабазов, порфиритов, пироксенитов, пикритов). Технология каменного литья включает плавление сырья при 1400-1450°C, формование отливок, последующую их кристаллизацию и отжиг. Минеральную вату получают путем плавления сырья при 1500-1600°C и раздува расплава в стеклянные волокна. Химический состав сырья определяет температуру плавления, кристаллизационные свойства расплава и эксплуатационные свойства продукции.

Для производства каменного литья используют породы, содержащие (мас.%) 47-52 SiO₂, 11-14 Al₂O₃, 10-17 (FeO+Fe₂O₃), 5-12 CaO, 4,5-12 MgO, 1,5-3,8 Na₂O, 0,5-3,5 K₂O.

На основании исследования кристаллизационных свойств расплавов и стекол из горных пород Карелии и сложных шихт широкого диапазона составов, свойств каменного литья, практики камнелитейного производства для оценки однородности и качества петругического сырья по химическому составу применены две диаграммы: известная диаграмма П.Ниггли и предложенная нами катионная диаграмма Ca-Mg-(Fe²⁺+Fe³⁺). В методе П.Ниггли пересчет химического состава сырья ведется на группировки, каждая из которых включает несколько оксидов. Группировки являются основой для построения пироксенов, оливинов, плагиоклазов. При этом учитывается возможность вхождения CaO, Na₂O, Al₂O₃, SiO₂ (группа L) в плагиоклазы, часть которых при кристаллизации петругического расплава остается в стеклообразном состоянии: SiO₂, CaO, MgO, FeO, Fe₂O₃ (группа M) – в оливины и пироксены; проявление SiO₂, избыточного по отношению к этим минералам – в виде остаточного стекла (Q).

Таким образом, диаграмма П.Ниггли отражает соотношение кристаллических и стеклообразных фаз.

Все изученные составы принадлежат трем сериям диаграммы П.Ниггли (рис.1). Составы 1-й серии лежат выше линии PF и характеризуется избыточным содержанием SiO₂ в нормативном составе. Предельное

содержание $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ в составах 1-й серии 61-66%. Составы 2-й серии расположены в пироксен-плагиоклазовом поле, в пределах треугольника $\text{P-F-T}_{\text{sch}}$, не содержат избытка SiO_2 ; предельное содержание $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 57-61 вес,%. К 3-й серии относятся близкие к мономинеральным пироксеновые составы, расположенные на линии P-T_{sch} , а также ненасыщенные кремнеземом, лежащие несколько ниже линии P-T_{sch} ; содержащие $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ – от 47 до 57%.

Недостатком диаграммы является объединение в одну группу М катионов Ca , Mg , Fe^{2+} , Fe^{3+} , имеющих различное влияние на свойства расплава, процесс минералообразования и свойства продукции. Эти особенности катионов раскрывает катионная диаграмма $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-(Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})$, отражающая соотношение катионов-модификаторов в атомных процентах.

Каждый состав характеризуется положением точек на 2-х диаграммах. Соответственно этому выделяются поля составов с различной очередностью минералообразования и различными свойствами. Первая цифра указывает область (серию) на диаграмме П.Ниггли, вторая – поле на катионной диаграмме (рис.1).

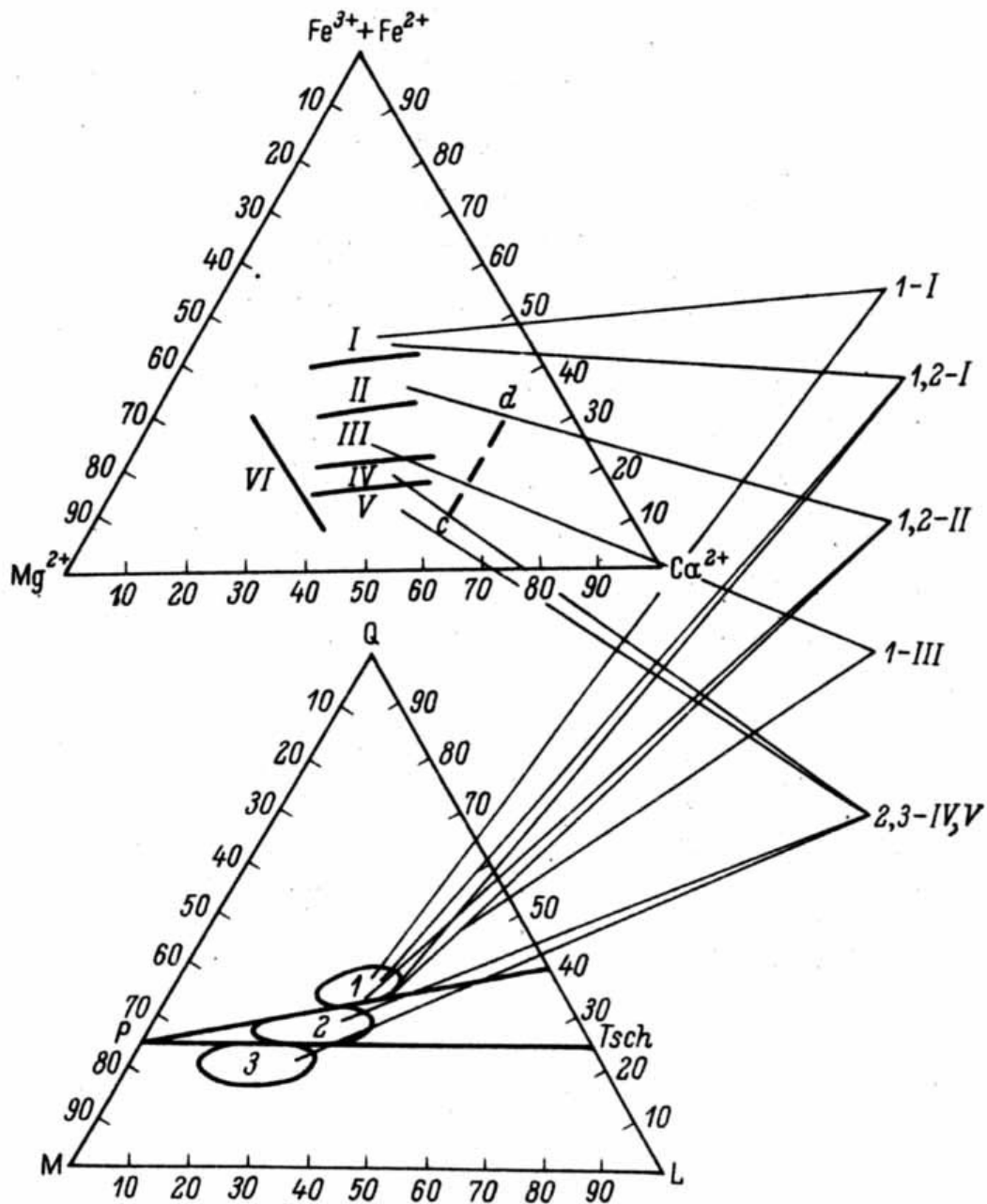


Рис. 1. Классификация сырья для производства каменного литья. 1-I – кислотоупорный порошок; 1, 2-I – мелкогабаритное каменное литье; 1, 2-II – среднегабаритное литье; 1-III – крупногабаритное и центробежное каменное литье, петроситаллы; 2,3-IV, V – термостойкое литье с высокой кислотостойкостью

1,2-1 – поле основных пород (базальтов, диабазов), при кристаллизации расплавов которых первым выделяется магнетит, то есть поле первичной кристаллизации магнетита. Стекла, полученные при закалке этих расплавов в воде, рентгеноаморфны и ферромагнитны, магнитная восприимчивость порядка $(8-30) \cdot 10^{-3}$. Это свидетельствует о присутствии в стекле зародышей кристаллов магнетита. Магнетит инициирует процесс расслоения расплавов 1 серии с образованием капель пироксенового состава и кислотостойкой плагиоклаз-кремнеземистой матрицы. Ликвационная структура обуславливает высокую химическую стойкость закаленных стекол (кислотостойкость в 20%-ной HCl > 90%). Составы являются оптимальными для получения кислотоупорного порошка методом грануляции расплава в воду (1-I) и мелкогабаритных плиточных изделий (половой и облицовочной плитки – 1,2-I), но непригодны для крупногабаритного и центробежного литья из-за низкого содержания кристаллической фазы и высоких напряжений в отливке, возникающих в период формирования в результате высокой скорости кристаллизации магнетита.

3-I – поле первичной кристаллизации магнетита для составов с высоким содержанием пироксеновой фазы в отливке. Эти составы не целесообразно использовать в петругрии, так как из-за высокой скорости объемной кристаллизации отливки при формировании растрескиваются.

Граница на катионной диаграмме между магнетитовым (I) и пироксеновыми полями (II – V) проходит при относительном содержании катионов железа 38-42%.

Стекла пироксенового поля, полученные закалкой расплава в воде, характеризуется низкой магнитной восприимчивостью и низкой кислотостойкостью.

Составы поля 1,2-II, лежащие близ фазовой границы, имеют высокую объемную скорость кристаллизации при достаточно большом количестве магнетитовых центров. Их целесообразно использовать для производства фасонных изделий методом статического литья (брусчатка, плиты тротуарные, футеровка гидроциклонов). Менее пригодны эти составы для центробежного литья.

Составы поля 1,2-III с меньшим содержанием $Fe^{2+}+Fe^{3+}$ являются лучшими для литья крупногабаритных полых изделий центробежным способом, так как при введении нуклеатора (хромита) обеспечивается достаточно полная кристаллизация расплава в период формирования при минимальном развитии напряжений. Кроме того, расплавы этого поля склонны к переохлаждению и кристаллизации стекла при нагревании «снизу». Поэтому их можно использовать для производства плитки по ситальной технологии, например, методом полужидкой подпрессовки, проката.

При плавлении и кристаллизации в окислительной атмосфере эти составы пригодны для получения петроситаллов с иризирующей поверхностью.

Поля 2,3-IV,V включают составы, обеспечивающие высокое содержание пироксеновой фазы в отливках при низком содержании магнетита, что позволяет получать из составов этого поля плитку с повышенной эксплуатационной термостойкостью при высокой кислотостойкости. Составы полей IV, V различаются по характеру кристаллизации стекол при термообработке «снизу». Стекла поля IV кристаллизуются объемно с образованием крупнозернистой структуры. Стекла поля V кристаллизуются с поверхности.

Границы полей I-V на катионной диаграмме имеют наклон к углу Mg^{2+} , что обусловлено меньшей степенью усвоения катионов железа в магнезиальных авгитах.

Составы 2,3-серии, обогащенные CaO (относительное содержание $Ca^{2+}>60\%$), при высокой термостойкости имеют пониженную кислотостойкость из-за кристаллизации силикатов кальция (воластонита $CaSiO_3$ и др.).

Составы поля VI независимо от положения на диаграмме П.Ниггли не рекомендуется применять для каменного литья, так как высокое содержание магния увеличивает температуру плавления и приводит к выделению оливинов, вызывающих брак изделий и снижающих кислотостойкость материала.

Эти же недостатки имеют составы, удаленные вниз от линии $P-T_{sch}$.

Для производства минеральной ваты применяются основные – ультраосновные горные породы и сложные шихты следующего химического состава (мас,%): 42-49 SiO_2 , 7-12 $(FeO+Fe_2O_3)$, 9-20 CaO, 9-18 MgO, 0,5-2,5 Na_2O , 0,2-1,5 K_2O .

На основании исследований, проведенных в Институте геологии и технологических испытаний в Институте ВНИИтеплоизоляция [2], а также данных по составам минеральной ваты в России и за рубежом [3, 4] на диаграммах выделены области оптимальных составов для минераловатного производства (рис.2).

На диаграмме П.Ниггли они относятся к 3-й серии, т.е. близки к мономинеральным пироксеновым составам. На катионной диаграмме находятся в пределах IV, V частично III полей и ограничены относительным содержанием Mg^{2+} – 60%.

Составы в пределах выделенных полей удовлетворяют требованиям к сырью по температурам плавления (1260-1300°C), низкой скорости кристаллизации и вязкости расплавов (6-8 пуаз при 1400°), полученное из них волокно достаточно водостойко (показатель $pH=2,4-2,5$), что определяет его долговечность.

Составы с относительным содержанием Mg^{2+} более 60% тугоплавки и имеют повышенную кристаллизационную способность вследствие выделения магнезиального оливина в процессе выработки. Такие технологические особенности магнезиальных расплавов затрудняют получение из них минерального волокна по одноконтинентной схеме.

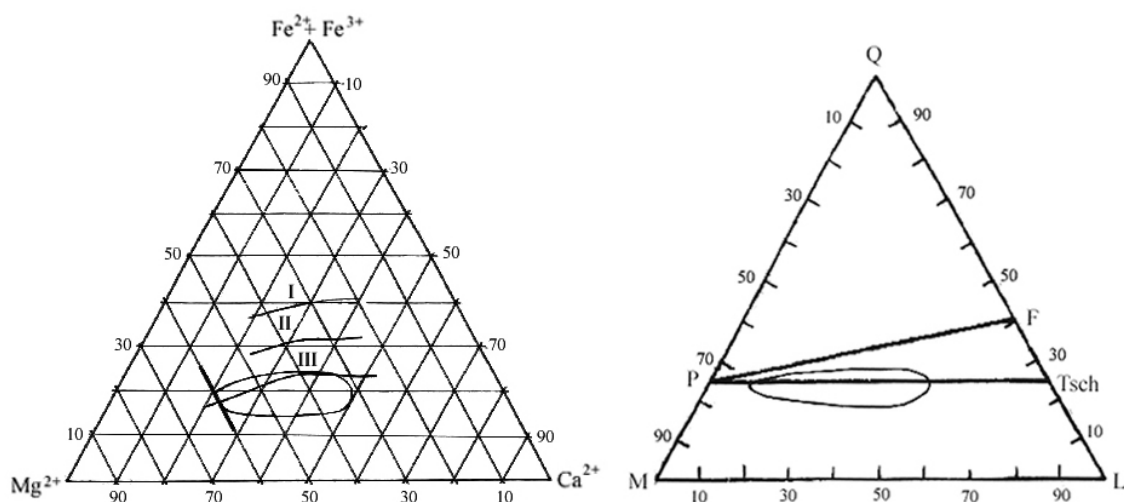


Рис. 2. Составы сырья для производства минеральной ваты

Высококальциевые составы, получаемые главным образом, на основе доменных и других шлаков с подкислителями (горными породами основного состава) имеют пониженную водостойкость, и, соответственно, менее долговечны.

Таким образом, разработанные диаграммы позволяют оценить однородность и качество сырья для базальтовых технологий на ранних стадиях геологоразведочных работ, а также рассчитать необходимые добавки с целью перевода составов сырья в область оптимальных для производства различных видов изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А.Лебедева, Г.П.Озерова, Ю.К.Калинин. Классификация петруггического сырья. Л. «Наука», 1979. – 120 с.
2. Г.А.Лебедева, А.П.Светов. Пикритовые базальты – перспективный вид сырья для производства минеральной ваты. //Комплексное и рациональное использование минерального сырья Карелии. Петрозаводск, 1986. – С.50-62.
3. Батанова А.М., Граменицкий Е.Н., Земцов А.Н. и др. Состав и физико-химические свойства стекловидных волокон на основе базальта. //Труды международной научно-практической конференции. Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее. Т. III. М.2003. – С.243-248.
4. Сырье для производства минеральной ваты в СССР. Каталог-справочник. Вильнюс. 1977. – 106с.

АННОТАЦИИ

УДК 549.0

МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ И ПРИРОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ. ПИРОГОВ Б.И. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛЛ.2. БИБЛИОГР.32 НАЗВ.

Показано, что технологические свойства минералов формируются в единой геолого-техногенной системе. «Жизнь», начатая в геологических процессах, продолжается в технологических аппаратах, но во времени и пространстве протекает она значительно быстрее, чем в природе. Она отражает двойную природу свойств минералов, информация о которых формируется на различных уровнях минералогической «памяти» – морфологическом, структурном и др. Интеграция минералогических методов с обогащением полезных ископаемых позволяет оценить систему природы технологических свойств минералов и научиться управлять ими при рудоподготовке и сепарации измельченных продуктов в технологической схеме.

It is shown, that technological properties of minerals are formed in uniform geology-technogenesis to system. The «Life» begun in geological processes, proceeds in technological devices, but in time and space it proceeds much more quickly, than in a nature. It reflects a double nature of properties of minerals, the information about which is formed at various levels mineralogical «memories» – morphological, structural etc. Integration of mineralogical methods with enrichment of minerals allows to estimate system of a nature of technological properties of minerals and to learn to operate them at ore-preparation and separations of the crushed products in the technological circuit.

УДК 549.08.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ОЖОГИНА Е.Г., РОГОЖИН А.А. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.3

Прикладные минералогические исследования современных сырьевых объектов, отличающихся сложностью состава и строения, проводятся комплексом минералого-аналитических методов изучения. Рациональный комплекс методов позволяют получать в сжатые сроки необходимую и достаточную информацию о составе, строении и свойствах минералов и руд в целом. Приведены примеры технологической оценки энергетических углей, марганцевых руд и техногенного сырья.

It is shown that applied mineralogical investigations of mineral raw material source featuring complex composition and pattern, require application of state-of-the-art comprehensive mineralogical-analytical methods. It is noted, that a rational combination of mineralogical methods to obtain complete and reliable information on composition, structure and properties of mineral and ores in whole. It is demonstrated the examples of processing assessment of coal, manganese ores, technogene raw material.

УДК 549.67 (470.13)

ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ НАНОМИНЕРАЛЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ. КОТОВА О.Б. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.2, БИБЛИОГР.10 НАЗВ.

В работе изложены перспективы развития технологической минералогии в свете наблюдающейся экспансии наноразмерных величин. Представлены современные способы (методы) получения наноминералов и особенности развития нанотехнологий.

The prospects for the development of technological mineralogy during expansion nanosize values are described. The modern ways (methods) of obtaining nanominerals and the special features of nanotechnology are presented.

УДК 549.470.22

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ КАРЕЛИИ. ЩИПЦОВ В.В. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.4, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.28 НАЗВ.

На примере индустриальных минералов Карелии рассмотрены два порядка типоморфных признаков, позволяющих более обоснованно предсказывать поведение минералов в технологических процессах. Детальные исследования индустриальных минералов из ряда месторождений и проявлений показали важность выявления типоморфных признаков

метаморфических и магматических минералов. Установлено влияние типоморфных свойств на показатели переработки конкретных промышленных минералов Карелии. На конкретных примерах месторождений кианита и апатита показаны особенности влияния геолого-минералогических факторов на образование природных типов руд.

The author gives some examples of Karelian industrial minerals to discuss two orders of typomorphic characters used to more reliably predict the behaviour of minerals in technological processes. Detailed studies of industrial minerals from some deposits and occurrences have shown how important it is to reveal the typomorphic characters of metamorphic and magmatic minerals. Typomorphic properties were shown to affect the recycling indices of some Karelian industrial minerals. Examples of kyanite and apatite deposits are given to show the effect of geological and mineralogical factors on the formation of natural ore types.

УДК 541.1(075.8)

КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА. Р.В.ГАЛИУЛИН // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ. 6, ТАБЛ.1 БИБЛИОГР.44 НАЗВ.

В статье показано, что основанный на системах Делоне, дискретный подход к описанию структуры Вселенной позволяет охватить все ее иерархические уровни, начиная от элементарных частиц и кончая упаковкой сверхскоплений галактик. В самом общем виде системы Делоне представляют расположения центров молекул в идеальном газе, в наиболее вырожденном виде – идеальные кристаллические структуры. Все остальные состояния материи находятся в промежутке между двумя этими предельными состояниями. Полученную извне энергию, система тратит на упорядочение, а идеальный порядок может быть только в кристаллических структурах. Поэтому открытые системы на любых иерархических уровнях стремятся к кристаллическому состоянию. С этим связано самосовершенствование кристаллов, эффект, далеко выходящий за границы кристаллографии.

The author shows that using a discrete approach to the structural description of the Universe, based on Delone's systems, one can cover all hierarchical levels from elementary particles to the packing of galactical superclusters. In the most general form, Delone's systems show the distribution of molecule centres in ideal gas, in the most degenerate form – perfect crystalline structures. All other states of matter are between these two limit states. The external energy received is used by the system for ordering, and perfect order can only be in crystalline structures. Therefore, open systems on any hierarchical levels try to approach a crystalline state. Connected with this is the self-perfection of crystals – the effect far beyond the scope of crystallography.

УДК 622.7.016.34

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ СРАСТАНИЙ В ПОРОДАХ И РУДАХ. ВОЙТЕХОВСКИЙ Ю.Л. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. БИБЛИОГР.10 НАЗВ.

В статье коротко рассмотрены основные моменты дискуссии, организованной проф. В.М. Изоитко в Институте «Механобр» и изложенной в журнале «Обогащение руд» несколько лет назад. Точка зрения автора состоит в том, что современная минералогия (в т.ч. технологическая) нуждается в теоретическом представлении о пространстве горной породы (руды). Оно может быть построено средствами математической статистики на основе фундаментальных концепций топологического, метрического и частично упорядоченного пространств.

The main points of the debates organized by Prof. V.M. Izoitko in the «Mekhanobr» Institute and published in the «Obogashchenije rud» Journal some years ago are briefly considered in the paper. The author's point of view is that recent mineralogy (technological mineralogy as well) needs a theoretical background of the rock (ore) space. It can be created in terms of mathematical statistics at the basement of such fundamental conceptions as topological, metrical and partly ordered spaces.

УДК 622.7.016.34

БАЛАНС ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РУДАХ. Ю.Л. ВОЙТЕХОВСКИЙ // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.6, ТАБЛ.6. БИБЛИОГР.6 НАЗВ.

В статье предложены возможные решения обратной задачи компонентного баланса в горных породах и рудах (т.е. расчета концентраций компонентов в минеральных фазах по концентрациям компонентов и весовым долям фаз в породе или руде). Рассмотрены три метода (средних значений, последовательных приближений и наименьших квадратов), сформулированные в дискуссиях автора с проф. В.М. Изоитко. Приведены примеры расчетов.

The possible solutions of an inverse problem of the component balance in rocks and ores (i.e. how to calculate the component concentrations in mineral phases provided the component concentrations and weight parts of phases in rocks and ores)

are suggested in the paper. Three methods (average values m., consecutive approximation m. and the least squares m.) developed thanks to author's discussions with Prof. V.M. Izoitko are considered. The real examples of calculations are given.

УДК 622.7

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РУД ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ. ПЕТРОВА Н.В., ОЖОГИНА Е.Г., РОГОЖИН А.А. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: БИБЛИОГР.9 НАЗВ.

Показаны особенности изучения химико-металлургического предела сырья методами технологической минералогии.

Peculiarities of studying chemical-and-metallurgical raw materials process stage by methods of technological mineralogy are shown.

УДК 553.435(470.6)

ПРОГНОЗ И ПОИСКИ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПИРИТА. ДЖАНГИРОВ М.Ю., БОГИЛЕВ А.В. РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.8 НАЗВ.

Для генетической индентификации и выделения промышленно перспективных рудных объектов конвергентного колчеданного оруденения рекомендуется использовать типоморфные структурные минералофизические показатели пирита.

For genetic determination and allocation of industrially perspective ore objects similar pyrites ores it is recommended to use typomorphic structural mineralphysically parameters pyrite.

УДК 553.48

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ БОГАТЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД. ХАШКОВСКАЯ Т.Н., ЛЯЛИНОВ Д.В.//РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.11, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.3 НАЗВ.

В институте «Гипроникель» разработана методика расчета минералогически достижимых показателей обогащения руд на основе анализа изображений. Она реализована на базе системы анализа изображений Иста ВидеоТест и СУБД Microsoft Access. В основе методики лежит исследование раскрытия минералов в измельченной руде посредством создания базы данных, содержащей информацию о минеральном составе отдельных зерен, химическом составе минералов и их плотности.

Анализ этой базы данных позволяет получать сведения о минеральном составе продукта, степени раскрытия «целевых» минералов, распределении минералов по классам крупности, а также, распределении ценных компонентов по минералам. Эти сведения используются для построения графиков в координатах содержание/извлечение, показывающих минералогически лимитированное качество концентратов/извлечение ценных компонентов.

Приводятся пример комплексного исследования богатой медно-никелевой руды с моделированием селективной схемы обогащения.

In the «Institute Gipronickel» JS has been developed the methodology of the calculation of mineralogically limited metal recovery from sulphide ores, based on the image-analysis data obtained by Video Test and processed by Microsoft Access. To this end, ore samples were ground then mineral liberation characteristics were obtained and a data bank containing mineral intergrowths, mineral compositions and mineral densities information was compiled.

These data allow to get valuable information of the initial ore mineral compositions, quality of commercial minerals liberation, size-by-size minerals/metals distribution. On this basis, mineralogically limited grade-recovery curves were plotted.

An example of the massive sulphide-ore integrated study with a selective-flotation flowsheet modeling, is presented.

УДК 548.735(549.02)

ИЗУЧЕНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ РУД НА СТАДИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ. БУБНОВА Т.П., СКАМНИЦКАЯ Л.С., ЩИЩОВ В.В. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.4, ТАБЛ.4. БИБЛИОГР.3 НАЗВ.

Технологическая минералогия имеет дело с изучением геологических характеристик и минералогических особенностей какого-либо объекта (месторождения), выраженных в количественном отношении. Многоплановое изучение фак-

торов, непосредственно влияющие на технологический процесс, определяющих типоморфные особенности руд и минералов позволяет оценить перспективы работ на стадиях, предшествующих геологоразведочным. В лаборатории геологии, технологии и экономики минерального сырья Института геологии проводятся работы по изучению таких промышленных минералов Карелии, как апатитсодержащие карбонатиты и пироксениты, нефелиновые сиениты, оливиниты (Тикшеозерско-Елетьозерский щелочной комплекс Лоухского района), анортозиты Котозерского массива, мусковитовые кварциты, гранатсодержащие породы, расположенные тоже на севере Карелии.

Technological mineralogy deals with the study of the quantitative geological and mineralogical characteristics of a deposit or occurrence. The multi-lateral study of the factors that directly affect a technological process and are responsible for the typomorphic characteristics of ores and minerals makes it possible to assess prospects prior to geological prospecting. The Laboratory of Geology, Technology and Economics of Mineral Products of the Institute of Geology studies some Karelian industrial minerals such as apatite-bearing carbonatites and pyroxenites, nepheline syenites, olivinites (Tikshozero-Yeletozero alkaline complex, Louhi District), anorthosites from the Kotozero massif, muscovitic quartzites and garnetiferous rocks that also occur in North Karelia.

УДК 549.651

РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ГЕОЛОГО-ПРОГНОЗНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТИПОВ РУД И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ. МЕЛЕНТЬЕВ Г.Б. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАНИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.1, ТАБЛ.2. БИБЛИОГР.11 НАЗВ.

Обосновывается применение методов перспективной оценки новых площадей и объектов на нескрытые эрозией или погребенные месторождения редкометальных пегматитов и гранитов. Перспективным представляется проведение подобных работ в Карелии и Кольском регионе, где рекомендуются доизучение и опытно-промышленная эксплуатация проявлений танталсодержащих и разведанных комплексных редкометальных пегматитов на СЗ фланге Колмозеро-Вороньетундровской жильной зоны, а также фторидно-иттриево-танталовых пегматоидных фаций щелочно-гранитных интрузий в Кейвах и т.д.

The author provides arguments in favour of methods for evaluation of new areas and prospects for the occurrence of rare-metal pegmatite and granite deposits, either unexposed by erosion or buried. It seems promising to conduct such studies in Karelia and on the Kola Peninsula, where it is recommended to carry out the additional study and experimental-economic exploitation of tantalum-bearing and prospected complex rare-metal pegmatite occurrences at the NW flank of the Kolmozero-Voronyetundrovskaya vein zone and the phthoride-yttrium-tantalum pegmatoid facies of alkaline-granitic intrusions in Keivy etc.

УДК 553.641:622.765

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД. КАМЕНЕВА Е.Е. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАНИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.6, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.5 НАЗВ.

Приведены результаты технолого-минералогического изучения апатитсодержащих руд различного генезиса. Обосновано, что основное влияние на флотационные свойства апатитсодержащих руд оказывают три группы факторов: 1) минеральный состав (парагенезис минералов, определяющий принадлежность руды в тому или иному технологическому типу и соотношение содержания основных рудообразующих минералов), 2) текстурно-структурные особенности (формы выделения апатита, степень раскрытия сростков апатита и сопутствующих минералов, наличие микровключений в зернах апатита и гранулометрический состав), 3) состав и свойства рудообразующего апатита (изоморфные примеси в катионной группе, дефектность кристаллической структуры, оцениваемая по количеству парамагнитных центров F⁻-O-F⁻). Совокупность этих факторов определяют конечные показатели флотации – качество концентрата и извлечение пятиоксида фосфора.

Неоднородность состава и технологических свойств апатитсодержащих руд вызывает необходимость учета всей совокупности факторов при геолого-технологическом картировании, прогнозной оценке обогатимости и решении практических задач, связанных с их обогащением.

The results of the technological and mineralogical study of genetically different apatite-bearing ores. The arguments presented show that the flotation properties of apatite-bearing ores are chiefly affected by three groups of factors: 1) mineral composition (the paragenesis of minerals, which shows the technological type of ore and the ratio of major ore-forming minerals); 2) textural and structural characteristics (forms of isolation of apatite, the degree of opening of apatite and accompanying mineral intergrowth, the presence of microinclusions in apatite grains and particle-size distribution); 3) the composition and properties of ore-forming apatite (isomorphic impurities in the cation group and defects in the crystalline structure assessed by the number of the paramagnetic centres of F⁻-O-F⁻). All these factors affect the final indices of flotation, the quality of concentrate and the extraction of phosphorus pentoxide.

As the composition and technological properties of apatite-bearing ores are heterogeneous, one should consider the above factors in geological-and-technological mapping, evaluation of expected dressability and solving dressing problems.

УДК 549.1:550.818:553.677:622.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ СЛЮД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ. ЛУЗИН В.П. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ТАБЛ.4. БИБЛИОГР.8 НАЗВ.

Рассматриваются результаты физических, химических и технологических исследований. Показано, что неизменные мелкокристаллические слюды по комплексным свойствам не уступают крупнокристаллическим одноименных разновидностей. Слюды из старых отвалов имеют незначительные изменения по таким же свойствам в сравнении со свежесбытыми и поэтому могут применяться на равных условиях. Приведены основные критерии качества и технологических свойств. Содержание в породах (рудах) мелкоразмерных слюд предлагается определять с применением технологических способов обогащения, что дает возможность учитывать ее не только с размерами кристаллов $-20+5$ мм, но и $-5+0.0$ мм. Это позволит на известных месторождениях увеличить запасы полезного ископаемого в 4-8 раз в случае их переоценки. Предложены методы разработки принципиальной схемы обогащения для получения слюдяных концентратов $-20+0.0$ мм. Рекомендован состав работ на основе технологической минералогии по стадиям геологоразведочных работ и при геолого-технологическом картировании. Обоснована перспектива комплексного использования основного полезного ископаемого, слюдяных руд и вскрышных пород, которая расширяет ассортимент выпускаемой продукции и повышает (примерно в два раза) экономическую эффективность использования недр и их суммарную стоимость.

The results of physical, chemical and technological researches are viewed. It is shown that unchanged fine-sized micas do not yield to macro crystalline the same varieties by their complex properties. The micas from old terraces have slight changes in such properties in comparison with new mined and so could be used on equal terms. Main criterions of quality and technological properties were presented. It is offered to define the tenor in layers (ores) using technological ways of concentrating and it gives us the possibility to take it into account not only with sizes of crystals $-20+5$ mm, but $-5+0.0$ mm too. It would let us increase the reserves of minerals in range of 4-8 times in case of their overestimation. The elaboration methods of schematic diagram of producing mica concentrates $-20+0.0$ mm. Work contents, based on technological mineralogy on stages of geological exploration and on geological technological mapping, was recommended. Substantiation of complex use perspective of the main mineral, mica ores and overburden, which widens the assortment of production and increases (about 2 times) economical efficient of using the bowels and their total cost.

УДК 553.611.6

ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН. ТРОФИМОВА Ф.А., ЛЫГИНА Т.З., САБИТОВ А.А., ГУБАЙДУЛЛИНА А.М., ПЕРМЯКОВ Е.Н., ШАМСЕМУХАМЕТОВА И.В., ШИНКАРЕВ А.А.// РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.9, ТАБЛ.5. БИБЛИОГР.5 НАЗВ.

Создавшаяся ситуация в России в отношении минерально-сырьевой базы щелочноземельных бентонитовых глин и потребности в них на российском рынке вынуждает не только увеличивать объем поисковых и поисково-оценочных работ, но и разрабатывать новые эффективные технологии модифицирования щелочноземельных бентонитовых глин с целью повышения качества бентонитовой продукции. В статье показано влияние на коллоидно-химические свойства глин механоактивационных процессов, при которых не только возрастают дисперсность и удельная поверхность глинистых частиц, но и повышается их реакционная способность. Анализ проведен с использованием аналитических методов исследований на примере щелочного бентонита Тихменевского месторождения (о-в Сахалин), щелочно-щелочноземельного бентонита месторождения Десятый Хутор (Республика Хакасия), щелочноземельной бентонитоподобной глины Березовского месторождения (Республика Татарстан), отличающиеся по минеральному и химическому составу.

The results of physical, chemical and technological studies are discussed. They have shown that unaltered finely-crystalline micas are not inferior in complex properties to macrocrystalline micas of the same varieties. Mica from old spoil heaps change their properties slightly in comparison with newly-mined and could thus be equally used. The basic criteria of quality and technological properties are presented. This will enable to estimate the amount of small-sized mica in layers (ores), using technological methods of dressing. This, in turn, will allow us to consider it with crystal sizes of $-20+5$ mm and $-5+0.0$ mm. We will be able to increase mineral reserves 4-8 times, if they are overestimated. Methods for development of schematic diagram of dressing to produce $-20+0.0$ mm mica concentrates are proposed. Types of work, based on technological mineralogy at geological exploration and geological-technological mapping stages, are recommended. Arguments are provided in favour of the multi-purpose use of the main commercial mineral, mica ores and overburden, which expands the assortment of products and doubles the economical efficiency of the use of mineral resources and their total cost.

УДК 553.6.04.

МЕТОДИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ОБЪЕКТОВ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ. ШАТНОВ Ю.А., ТУРАШЕВА А.В. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕ-

ДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ТАБЛ.2. БИБЛИОГР. 7 НАЗВ.

В статье изложена методическая схема определения геолого-экономической значимости проявлений кварцевого сырья на ранних стадиях геологоразведочных работ. Разработаны и предлагаются к применению при расчётах стартовой цены лицензируемых прогнозно-поисковых объектов интегральные оценки благоприятности освоения на основе корректирующих параметров к базовой стоимости.

The article presents the methodical scheme of definition of the geological-economic importance of displays of quartz raw material at early stages of geological prospecting. Integrated estimations of development perspective on the basis of correcting parameters to the base cost are developed and recommended for application at calculations of the starting value of licensed search objects.

УДК 553.87

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ. БЫДТАЕВА Н.Г., КИСЕЛЕВА Р.А., МИЛЕЕВА И.М. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.5, ТАБЛ.2. БИБЛИОГР.12 НАЗВ.

Предложен комплекс экспресс-методов для предварительной оценки качества природного кварца на ранних стадиях геологоразведочных работ. Комплекс лабораторных исследований позволит достаточно полно оценить качество природного сырья и отбраковать его труднообогащаемые разновидности.

A complex of low-cost express methods was proposed for the preliminary estimation of the quality of natural quartz during early stages of geological prospecting operations. Combined laboratory investigations provide a means for the comprehensive assessment of the quality of natural raw materials and reject their varieties with poor processing properties.

УДК 549.514.51

СТРУКТУРНЫЕ ПРИМЕСИ В КВАРЦЕ КАК ВАЖНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ И ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ. ДАНИЛЕВСКАЯ Л.А., РАКОВ Л.Т. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.4, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.11 НАЗВ.

Структурные примеси в кварце являются практически неудаляемыми при обогащении кварцевого сырья и поэтому фактически определяют предел его обогатимости. Изучение структурных примесей на ранних стадиях оценки месторождений кварцевого сырья является одним из важнейших критериев оценки качества сырья. Приведены результаты исследований структурных примесей в кварце различных генетических типов Карелии. Установлено, что кварц, претерпевший низкотемпературные метаморфические преобразования с образованием вторично рекристаллизованного кварца, содержит минимальное количество структурных примесей, в то время как наиболее загрязненным структурными примесями является гранулированный кварц.

Structural impurities in quartz are practically unremovable during quartz dressing and are, therefore, responsible for the dressability limit of quartz. The study of structural impurities at the early stages of appraisal of quartz deposits is one of the most essential criteria for assessment of quartz quality. The results of the study of structural impurities in different genetic types of Karelian quartz are presented. It has been found that quartz, metamorphosed at low temperatures to form secondarily recrystallized quartz, contains a minimum amount of structural impurities, whereas granulated quartz is most heavily contaminated with structural impurities.

УДК 666.364:553.613+666.593

ОЦЕНКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЕКОВ ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФАРФОРА, ИЛЬИНА В.П. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.2, ТАБЛ.3. БИБЛИОГР.5 НАЗВ.

Выполнены исследования диэлектрических свойств спеков нетрадиционных видов кварцполевошпатowych пород для выявления новых видов сырья для электрофарфора. Установлено, что с увеличением количества стеклофазы, обогащенной оксидом калия, как наблюдается у геллефлинты и сиенитов Елетьезеро, улучшаются диэлектрические свойства ($\text{tg}\delta$, Igr), а показатели ϵ близки к пегматита. Для электрофарфора перспективными, по показателям диэлектрических свойств, являются сиениты Елетьезеро ($\epsilon - 6, 5$; $\text{tg}\delta - 0,032$; $\text{Igr} - 1,51 \cdot 10^{12} \text{ ом} \times \text{см}$).

The dielectrical properties of the cakes of the nonconventional types of quartz-feldspathic rocks were studied to reveal new types of raw materials for electrical porcelain production. It has been found that with an increase in the amount of a potassium

oxide-enriched glass phase, which is the case for Yeletzero halleflinta and syenites, dielectrical properties ($\text{tg}\delta$, Igp) improve and ϵ -indices are close to those of pegmatite. Considering their dielectrical properties (ϵ 6.5; $\text{tg}\delta$ 0.032; Igp $1.51 \cdot 10^{12} \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$), Yeletzero syenites are most prospective for electrical porcelain production.

УДК 549.08:539.26:553.32.

ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД КАРЕЛИИ. ЛУГОВСКАЯ И.Г. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.9, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.8 НАЗВ.

Продемонстрированы возможности технологической минералогии при исследовании сорбционно-каталитических свойств материалов на основе шунгитовых пород Карелии.

The possibilities of technological mineralogy when, studying sorption-catalytic properties of materials on the basis of shungite rocks are shown.

УДК 553.95:666.765

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД. ТЯГАНОВА В.И., ЗАВЕРТКИН А.С. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.2, ТАБЛ.3. БИБЛИОГР.8 НАЗВ.

Для количественной оценки термической стойкости шунгитовых пород была предложена методика определения показателя термической стойкости этих пород. Методика не требует сложного лабораторного оборудования, а метод позволяет надёжно определять качество сырья.

For quantitative evaluation of thermal stability of a shungite rocks the strategy for determination of a thermal stability index of these rocks was offered. The strategy does not require a complex labware, but the method permits to reliable determine a raw material quality.

УДК 552

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ КУСКОВАТОСТИ (ФРУСТУМАЦИИ ИЛИ ОБРАЗОВАНИЯ «ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ») ГОРНЫХ ПОРОД. ПОВАРЕННЫХ М.Ю., БЕСКИН С.М. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С.: ИЛ.4. БИБЛИОГР.56 НАЗВ.

Дан обзор и приведен анализ, что с появлением в руках у исследователей автоматических анализаторов изображения, автогониометров, рентгеновских микротомографов и нейтронно-рентгеновских спектрометров анализа текстур, резко вырос интерес к стереологии горных пород, а также к их теоретическому рассмотрению с использованием современного синергетического подхода и математического аппарата теорий графов и фрактальных кластеров.

В статье представлены первые шаги по выявлению и визуализации фрустумов, которые были предприняты в ходе макрофизиографического петрографического анализа ряда горных пород. Фрустурация горных пород была нами впервые выявлена при воздействии коротковолнового (длина волны $\lambda=254$ нанометра) ультрафиолетового излучения ртутно-кварцевой лампы высокого давления СВД-120 как источника возбуждения люминесценции в нескольких образцах Каррарского (Тоскана, Италия) статуарного мрамора и ещё в многочисленных образцах горных пород различного генезиса. Приводятся характерные размеры и форма фрустумов в исследованных горных породах. Наименьшие по числу их составляющих минеральных зёрен принадлежат мономинеральным горным породам: датолитовому скарну, силицитовому кварцевому ядру пегматита, галиту и статуарному мрамору (около 125-300 зёрен в объёме). Самые крупные фрустумы зафиксированы в полиминеральных горных породах: амазонит-альбитовом и пегматоидном альбит-амазонитовом гранитах (более 5000-6000 зёрен в объёме). Отмечено, что наложенные процессы (амазонитизация, альбитизация и окварцевание в гранитах, развитие рудной минерализации в щелочном граните) наследуют границы фрустумов в качестве ослабленных зон в этих горных породах и в какой-то степени подчёркивают их своим преимущественным распространением.

Appearance of the automatic image analyzers, autogoniometers, R-microtomographers and neutronographic structure spectrometers rapidly increased the interest to the rock stereology as well as to their consideration using modern synergetical ideas combined with mathematical apparatus of the graph and fractal clusters theories.

In the article one can observe the first steps of the revealing and visualization of frustums while macrophysiographical petrographical analysis of several rocks. Frustumation has been firstly revealed in several samples of the Carrara (Toskana, Italy) statuary marble under the influence of short-wave (254 nm) ultra-violet emanation of mercury-quartz high-pressure lamp SVD-120 as a source of luminescence stimulation, and then in numerous samples of several rocks of different genesis. Characteristic dimensions and outlines of the frustums within the rocks investigated are discussed. The smallest frustums by the amount of

mineral grains they contained have been observed in monomineral rocks: datolitic scarn, silicate quartz pegmatite nucleus, galite and statuary marble (about 125-300 grains in volume). The greatest frustums have been observed in polymineral rocks: medium-grained amazonite-albitic and pegmatoid rare-metal granites (more than 5000-6000 grains in volume). As it is shown, the later subsequent processes (amazonitization, albitization, and quartzitization in granites as well as ore mineralization development in alkaline granite) inherited the frustums boundaries as weakened zones within these rocks and to some extent underlined it by their more abundant occurrence.

УДК 553.521:[552.08:53+552.08:54] (470.22)

ВЛИЯНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. О.В. МЯСНИКОВА. // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДочНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С. : ИЛ.2, ТАБЛ.1. БИБЛИОГР.3 НАЗВ.

На примере месторождений гранитов Карелии рассмотрено влияние типоморфных особенностей основных породообразующих минералов на физико-механические свойства горных пород, применяемых в качестве облицовочного камня.

Приведены результаты исследования химического состава, минералого-петрографических и физико-механических характеристик для различных типов облицовочных гранитов. Установлено, что основные изменения физико-механических показателей обусловлены составом, типоморфизмом и содержанием полевых шпатов, а также структурными особенностями и наличием темноцветных минералов в гранитах.

The effect of the typomorphic characteristics of major rock-forming minerals on the physico-mechanical properties of the rocks used as facing stone is discussed. Karelian granite deposits are used as examples.

The chemical composition, mineralogical-petrographic and physico-mechanical characteristics of various types of facing granites were studied and the results obtained are presented. Changes in physico-mechanical parameters are shown to be caused chiefly by the composition, typomorphism and percentage of feldspar and the presence of dark-coloured minerals in granites.

УДК 622.353.2

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СЫРЬЯ ДЛЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. Г.А.ЛЕБЕДЕВА, Г.П.ОЗЕРОВА // РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДочНЫХ РАБОТ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН, 2006. С. : ИЛ. 2. БИБЛИОГР.4 НАЗВ.

Показано, что разработанные диаграммы позволяют оценить однородность и качество сырья для базальтовых технологий на ранних стадиях геологоразведочных работ, а также рассчитать необходимые добавки с целью перевода составов сырья в область оптимальных для производства различных видов изделий.

The authors show that the diagrams developed can be used to assess the homogeneity and quality of raw material for basaltic technologies at the early stages of geological prospecting and to calculate the additives required to make the compositions of raw material optimum for the manufacturing of various products.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пирогов Б.И.</i> МЕТОДОЛОГИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ И ПРИРОДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛОВ	6
<i>Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	16
<i>О.Б.Котова.</i> ИНДУСТРИАЛЬНЫЕ НАНОМИНЕРАЛЫ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ	20
<i>Щипцов В.В.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ КАРЕЛИИ	25
<i>Р.В.Галиулин.</i> КРИСТАЛЛОГРАФИЯ ТАБЛИЦЫ МЕНДЕЛЕЕВА	32
<i>Ю.Л. Войтеховский.</i> СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ СРАСТАНИЙ В ПОРОДАХ И РУДАХ	42
<i>Ю.Л. Войтеховский.</i> БАЛАНС ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ И РУДАХ	46
<i>Петрова Н.В., Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.</i> ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РУД ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	53
<i>Джангиров М.Ю., Богилев А.В.</i> ПРОГНОЗ И ПОИСКИ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ <i>Хашковская Т.Н., Лялинов Д.В.</i> НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПИРИТА	60
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ БОГАТЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД	61
<i>Бубнова Т.П., Скамницкая Л.С., Щипцов В.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ МИНЕРАЛОВ при ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ РУД НА СТАДИИ ПОИСКОВО-ОЦЕНОЧНЫХ РАБОТ	69
<i>Мелентьев Г.Б.</i> РАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДОВ ГЕОЛОГО-ПРОГНОЗНОЙ И ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЙ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РЕДКОМЕТАЛЬНЫХ ПЕГМАТИТОВЫХ ПОЛЕЙ С ВЫДЕЛЕНИЕМ ТИПОВ РУД И ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ	74
<i>Каменева Е.Е.</i> ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ АПАТИТСОДЕРЖАЩИХ РУД	82
<i>Лузин В.П.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ СЛЮД ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ	88
<i>Трофимова Ф.А., Лыгина Т.З., Сабитов А.А., Губайдуллина А.М., Пермиков Е.Н., Шамсемухаметова И.В., Шинкарев А.А.</i> ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОЛЛОИДНЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН	99
<i>Ю.А. Шатнов, А.В. Турашева.</i> МЕТОДИЧЕСКАЯ СХЕМА ОЦЕНКИ ГЕОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ОБЪЕКТОВ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ	110
<i>Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Милеева И.М.</i> ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ с ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	112
<i>Данилевская Л.А., Раков Л.Т.</i> СТРУКТУРНЫЕ ПРИМЕСИ В КВАРЦЕ КАК ВАЖНЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ И ПРОГНОЗА ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	119
<i>В.П. Ильина.</i> ОЦЕНКА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЕКОВ ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ	124
<i>Луговская И.Г.</i> ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ В ИССЛЕДОВАНИИ СОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД КАРЕЛИИ	128
<i>Тяганова В.И., Заверткин А.С.</i> КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ШУНГИТОВЫХ ПОРОД	134
<i>Поваренных М.Ю., Бескин С.М.</i> ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И АНАЛИТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ КУСКОВАТОСТИ (ФРУСТУМАЦИИ ИЛИ ОБРАЗОВАНИЯ «ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ») ГОРНЫХ ПОРОД	138
<i>О.В. Мясникова.</i> ВЛИЯНИЕ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД	145
<i>Г.А.Лебедева, Г.П.Озерова.</i> ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ СЫРЬЯ ДЛЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	149
АННОТАЦИИ	153

CONTENTS

<i>Pirogov, B.I.</i> METHODOLOGY OF TECHNOLOGICAL MINERALOGY AND THE NATURE OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MINERALS	6
<i>Ozhogina, E.G. and Rogozhin, A.A.</i> TECHNOLOGICAL MINERALOGY IN SOLVING PROBLEMS IN THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF COMMERCIAL MINERALS	16
<i>Kotova, O.B.</i> INDUSTRIAL NANOMINERALS AND PROBLEMS IN TECHNOLOGICAL MINERALOGY ...	20
<i>Shchiptsov, V.V.</i> TECHNOLOGICAL MINERALOGY IN EVALUATION OF KARELIAN INDUSTRIAL MINERALS	25
<i>Galiulin, R.V.</i> CRYSTALLOGRAPHY OF MENDELEYEV'S TABLE	32
<i>Voitekhovsky, Y.L.</i> STATISTICAL ANALYSIS OF MINERAL INTERGROWTHS IN ROCKS AND ORES	42
<i>Voitekhovsky, Y.L.</i> BALANCE OF CHEMICAL ELEMENTS IN ROCKS AND ORES	46
<i>Petrova, N.V., Ozhogina, E.G. and Rogozhin, A.A.</i> CHARACTERISTICS OF THE MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL STUDY OF ORES BY CHEMICAL-METALLURGICAL METHODS	53
<i>Dzhangirov, M.Y. and Bogilev, A.V.</i> PREDICTION AND PROSPECTING OF CHALCOPYRITE DEPOSITS ON THE BASIS OF THE MINERAL-PHYSICAL INDICES OF PYRITE	60
<i>Khashkovskaya, T.N. and Lyapinov, D.V.</i> THE USE OF IMAGE ANALYSIS FOR MODELLING OF THE DRESSING INDICES OF HIGH-GRADE COPPER-NICKEL ORES	61
<i>Bubnova, T.P., Skamnitskaya, L.S. and Shchiptsov, V.V.</i> THE STUDY OF THE TYPOMORPHIC CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL MINERALS IN TECHNOLOGICAL EVALUATION OF ORES AT THE PROSPECTING-AND-EVALUATION STAGE	69
<i>Melentyev, G.B.</i> RATIONAL COMBINATION OF METHODS FOR GEOLOGICAL-PROGNOSTIC AND DIFFERENTIATED MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL EVALUATION OF RARE-METAL PEGMATITE FIELDS WITH IDENTIFICATION OF ORE TYPES AND ESTIMATION OF THEIR POTENTIAL PRODUCTIVITY	74
<i>Kameneva, E.E.</i> CHARACTERISTICS OF TECHNICAL AND MINERALOGICAL EVALUATION OF APATITE-BEARING ORES	82
<i>Luzin, V.P.</i> TECHNOLOGICAL MINERALOGY OF SMALL-SIZED MICAS IN THE STUDY OF NATURAL AND ARTIFICIAL MINERAL DEPOSITS	88
<i>Trofimova, F.A., Lygina, T.Z., Sabitov, A.A., Gubaidullina, A.M., Permyakov, E.N., Shamsemukhametova, I.V. and Shinkarev, A.A.</i> THE EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION PROCESSES ON CHANGES IN THE COLLOID AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF BENTONITIC CLAYS	99
<i>Shatnov, Y.A. and Turasheva, A.V.</i> METHODOICAL SCHEME OF EVALUATION OF THE GEOLOGICAL AND ECONOMIC SIGNIFICANCE OF QUARTZ PROSPECTS	110
<i>Bydtaeva, N.G., Kiseleva, R.A. and Mileeva, I.M.</i> PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE QUALITY OF QUARTZ TO PREDICT ITS TECHNOLOGICAL INDICES	112
<i>Danilevskaya, L.A. and Rakov, L.T.</i> STRUCTURAL IMPURITIES IN QUARTZ: AN IMPORTANT CRITERION FOR ASSESSMENT OF THE QUALITY OF QUARTZ AND PREDICTION OF ITS TECHNOLOGICAL PROPERTIES	119
<i>Ilyina, V.P.</i> EVALUATION OF THE DIELECTRICAL PROPERTIES OF CAKES FROM FELDSPAR AS A RAW MATERIAL FOR ELECTROTECHNICAL CERAMICS	124
<i>Lugovskaya, I.G.</i> POTENTIAL OF TECHNOLOGICAL MINERALOGY IN THE STUDY OF SORPTIVE-CATALYTIC MATERIALS BASED ON KARELIAN SHUNGITE ROCKS	128
<i>Tyaganova, V.I. and Zaverkin, A.S.</i> QUANTITATIVE ESTIMATION OF THE THERMAL RESISTANCE OF SHUNGITE ROCKS	134
<i>Povarennykh, M.Y. and Beskin, S.M.</i> THE USE OF MODERN TECHNICAL AND ANALYTICAL FACILITIES TO REVEAL THE PRIMARY LUMPINESS (FRUSTUMATION OR FORMATION OF AN «ELEMENTARY CELL») OF ROCKS	138
<i>Myasnikova, O.V.</i> THE EFFECT OF THE TYPOMORPHIC CHARACTERISTICS OF MAJOR ROCK-FORMING MINERALS ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS	145
<i>Lebedeva, G.A. and Ozerova, G.P.</i> GRAPHICAL METHOD FOR EVALUATION OF RAW MATERIAL FOR BASALTIC TECHNOLOGIES	149
ABSTRACTS	153

Научное издание

РЕЗУЛЬТАТЫ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ РУД МЕТАЛЛОВ
И ПРОМЫШЛЕННЫХ МИНЕРАЛОВ НА РАННИХ СТАДИЯХ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Материалы подготовлены в авторской редакции

Серия ИД. Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99 г. Сдано в печать 23.11.06г. Формат 60x84¹/₈. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 21,5. Усл. печ. л. 19,1. Тираж 300 экз. Изд. № 75. Заказ № 000.

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
Петрозаводск, пр.А.Невского, 50