# ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Сборник статей
по материалам докладов VII Российского
семинара по технологической минералогии

RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
KARELIAN RESEARCH CENTRE
INSTITUTE OF GEOLOGY

# FORECAST EVALUATION OF THE TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MINERALS BY APPLIED MINERALOGY METHODS

**Collection of articles following the VII Russian Seminar of the Technological Mineralogy**

**Moscow, April, 9–11, 2012**

Edited by Dr.sc. Vladimir V.Shchiptsov

Petrozavodsk
2013

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ

# ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ

**Сборник статей по материалам докладов VII Российского семинара по технологической минералогии**

**Москва, 9–11 апреля 2012 г.**

Под редакцией д.г.-м.н. В.В.Щипцова

Петрозаводск
2013

УДК 549.08: 553.6 (063)
ББК 26.34
П78

Рецензент
к.г.-м..н. *И.Н.Бурцев*

П78 **ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ.** Сборник статей по материалам докладов VII Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2013. – 188 с.

ISBN 978-5-9274-0560-2

ISBN 978-5-9274-0560-2

© Российское минералогическое общество, 2013
© Карельский научный центр РАН, 2013
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2013

# ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу седьмого выпуска сборника научных статей по технологической минералогии положены материалы 7-ого Российского семинара «Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии», который прошел 9-11 апреля 2012 г. в г. Москва на базе ФГУП «ВИМС». Семинар организовали Комиссия по технологической минералогии РМО, ФГУП «ВИМС» и Институт геологии Карельского научного центра РАН.

В семинаре приняли участие около 60 специалистов 15 научных организаций, вузов, предприятий, министерств и ведомств, представляющих различные регионы России - Апатиты, Екатеринбург, Казань, Красноярск, Магнитогорск, Москва, Новосибирск, Петрозаводск, Санкт-Петербург, Сыктывкар, Хабаровск.

Рассматривались следующие актуальные проблемы технологической минералогии:

1. Фундаментальные проблемы технологической минералогии
2. Влияние геолого-минералогических факторов на технологические свойства сырья
3. Комплексный подход в применении современных методов прикладной минералогии при оценке технологических свойств минералов
4. Новые подходы в обогащении на основе принципов технологической минералогии.

На открытии семинара с приветственным словом выступил академик РАН, президент РМО **Рундквист Д.В**., а также директор Института геологии КарНЦ РАН, председатель Комиссии по технологической минералогии РМО **Щипцов В.В.** и первый зам. директора ФГУП «ВИМС» **Рогожин А.А.**

На семинаре заслушаны пленарные доклады от институтов, занимающихся проблемами технологической минералогии, и ведущих специалистов в данной области исследований. Основные доклады:

**Пирогов Б.И. (Московское отделение РМО)** История становления и развития технологической минералогии

**Щипцов В.В. (Карельское отделение РМО)** Роль и место технологической минералогии в высоких технологиях XXI века

**Войтеховский Ю.Л. (Кольское отделение РМО)** О методологии технологической минералогии

**Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. (Московское отделение РМО)** Прогнозная оценка качества минерального сырья методами прикладной минералогии

**Котова О.Б. (Сыктывкарское отделение РМО)** Физика поверхности минералов как метод прогнозной оценки их технологических свойств

**Лыгина Т.З. (Казанское отделение РМО)** Технологическая минералогия – портал к новым познаниям

11 апреля был проведен Круглый стол по теме «Технологическая минералогия: вчера, сегодня, завтра. Применение современных физических методов в технологической минералогии», а также проведено открытое заседание Комиссии по технологической минералогии в составе: д.г.-м.н. Щипцов В.В.(председатель Комиссии, Карельское отделение РМО), к.г.-м.н. Данилевская Л.А. (секретарь Комиссии, Карельское отделение РМО)), проф. д.г.м.н. Войтеховский Ю.Л. (Кольское отделение РМО), проф, д.г.-м.н. Пирогов Б.И. (Московское отделение РМО), д.г.-м.н. Лыгина Т.З. (Казанское отделение РМО), Ожогина Е.Г. (Московское отделение РМО), Левченко Е.Н. (Московское отделение РМО), Нурканов Е.Ю. (Уральское отделение РМО), Горбатова Е.А (Уральское отделение РМО), на которое были приглашены участники семинара.

Впервые на семинаре была выделена отдельная секция для докладов молодых ученых, на которой было представлено 9 докладов. Три лучших докладчика были отмечены почетными грамотами ФГУП «ВИМС»: Перовский И.А., Бугаенко Ю.И., Жукова В.Е.

В заключительной части работы семинара, подводя итоги, участники отметили важность применения и развития оптико-геометрических методов для целей технологической минералогии. В связи с существующими проблемами стереологических реконструкций необходимо сформировать программу дальнейших совместных действий ученых минералогов-технологов и разработчиков программ. Обращено внимание на вопросы понятийной базы наноминералогии (возможности измерения свойств наноминералов) в связи с внедрением в наномир при минералого-технологических исследованиях.

Участниками рекомендовано в рамках деятельности Комиссии по технологической минералогии РМО, во-первых, провести семинар по приборам и программам оптико-геометрических и других методов, на который пригласить специалистов в области минералогии и представителей компаний – разработчиков программ, во-вторых, информировать геологическую общественность о необходимости решения проблем использования отвалов месторождений.

На заседании Комиссии по технологической минералогии принято постановление о вводе в состав комиссии новых членов – Рогожина Александра Алексеевича, Нерадовского Юрия Николаевича, Кузьмина Владимира Ивановича, Зинчука Николая Николаевича, Ожогина Дениса Олеговича.

Следующий VIII Российский семинар состоится в Санкт-Петербурге на базе НПК «Механобр-Техника» по проблеме «Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья».

Участники семинара отметили высокий уровень проведения научного мероприятия и хорошую подготовку со стороны ФГУП «ВИМС» и выразили большую благодарность за хорошую организацию руководству организации.

В предлагаемом сборнике трансформированы главные направления проведенного обсуждения на семинаре. Участники семинара отметили высокий уровень проведения научного мероприятия и хорошую подготовку со стороны ФГУП «ВИМС» и выразили большую благодарность за хорошую организацию руководству организации. В данном предисловии уместно еще раз выразить персональную благодарность генеральному директору ФГУП «ВИМС» Г.А.Машковцеву, первому заместителю генерального директора по научной работе А.А.Рогожину, заведующей минералогического отдела Е.Г.Ожогиной и к.г.-м.н.А.В.Иоспе.

Признательность выражаем и благодарим зам. директора по научной работе ИГ Коми НЦ УрО РАН, к.г.-м.н. И.Н.Бурцева за его неформальное рецензирование сборника научных трудов и добрые советы.

# ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

***Пирогов Б.И.***

ФГУП «ВИМС», Москва, pirogov_bi@inbox.ru

«Минералогия как наука выросла из потребностей практики – поискового и горного дела, металлургии и минеральной технологии, поэтому вопросам использования минералов всегда отводилась важная роль в структуре минералогического знания» (*Юшкин Н.П., 1984*)

Технологическая минералогия (ТМ) является важнейшим направлением прикладной минералогии, увязывающим ее с основами теории минералогии, физики и химии твердого тела, достижениями таких наук, как поиски, разведка и оценка месторождений полезных ископаемых, обогащение, экономика и экология. Она позволяет с единых позиций проследить весь ход изменений минерального вещества (МВ) литосферы через технологию обработки и переработки в литосфере отходов [2].

**В современном понимании *ТМ объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков полезных ископаемых*** (ПИ)***, технологических свойств минералов*** (ТСМ) ***на макро-, микро- и нано- уровнях в эволюции единой геолого-техногенной системы*** (ЕГТС)***, направленные на комплексное использование минерального сырья*** (МС)***, разработку рациональных и экологически чистых технологий. Именно здесь синтезируются все методологические и методические подходы, выработанные за длительную историю направления, составляющие в отдельные периоды главное ее содержание.*** В своем становлении и развитии ТМ прошла большой путь, объединенный нами в 6 этапов.

### Этап I. Становление научного направления ТМ (1798-1829 гг)

**В.М. Севергин** - ***академик, минералог и химик-технолог***

Развитие горного дела в России во второй половине XYIII в. связано с необходимостью становления и развития минерально-сырьевой базы страны, с углубленным изучением минералов, их прикладного значения для выявления и оценки месторождений полезных ископаемых (МПИ). Этому способствовали исследования М.В. Ломоносова и его последователей. **Прежде всего, к ним следует отнести работы акад. В.М. Севергина,** который в своем учебнике 1798 г «Первые основания минералогии, или естественной истории ископаемых тел» сформулировал задачи минералогии в целом, связанные с изучением строения и состава минералов; выяснением их взаимоотношений в месторождениях; установлением возможности практического использования. Более 210 лет тому назад в этом учебнике **он впервые ввел понятия «технологическая и экономическая» минералогия**, *что и определило дальнейшую традиционную практическую направленность российской минералогии.* В понимание значения этого нового направления прикладной минералогии (ПрМ) он вкладывал свои представления (1791 г) о том, каким должен

быть минералог, занимающийся проблемами технологии МС: «***Я разделяю минералогов на систематиков, технологов и философов в пространном смысле.*** Первые, приводя ископаемые тела в порядок, научают оные познавать; вторые – употреблять их в пользу, а последние, созерцая различные их отношения, свойства и разные их явления, доискиваются причины оных. ***Того, кто все сии предметы надлежащим объемлет образом, называем мы совершенным минералогом».*** Поэтому в учебнике особое внимание уделялось систематизации сведений о минералах и признаках (эмпирические, физические, внешние и химические), по которым следует их квалифицировать. Севергин В.М. еще в 1792 г. пришел к важному выводу о том, что «…лучшие признаки для главного разделения суть химические, ибо они ясно, точно, кратко и твердо определяют ископаемое тело» («Всеобщие рассуждения о минералогии, читанные во время открытого прохождения минералогии при Академии наук летом 1792 г» – Новые ежемесяч. соч., СПб, 1792, сент., ч.75, с. 69). В 1804 г он основал и издавал вплоть до 1826 г «Технологический журнал», в котором подчеркивал, что «…без точных наблюдений и исследований нет и не может быть науки» [3]. ***Этот девиз великого ученого предопределил будущее ТМ, которое в дальнейшем было связано с морфологическим, кристаллохимическим и генетическим направлениями минералогии, с оценкой и обогащением различных видов ПИ***. На протяжении 22-х лет издания В.М. Севергин освещал в нем наиболее значимые технологические проблемы, посвященные самым различным вопросам технологии производства металлов и сплавов, минеральных и растительных красок, солей (селитры, поташа, квасцов, соды) и других важных продуктов. Он отбирал из различных иностранных источников наиболее интересные и актуальные для читателей статьи и заметки, освещая их переводы. Огромная работа по пропаганде рациональной технологии различных материалов была отражена им в двухтомном учебнике «Начертания технологии минерального царства», изданном в 1821–1822 гг. Деятельность В.М. Севергина в области технологии и, прежде всего, в химической, теснейшим образом была связана с его научными исследованиями по химии и минералогии, с оценкой качества исходного сырья и продуктов обогащения. Ведь он жил и творил в эпоху великих реформ и крупнейших открытий в химии. Практические же работы химиков и минералогов по своей сущности и направлению были аналитическими. Как справедливо подчеркивали Н.Н. Ушакова и Н.А. Фигуровский [3], Севергин не был одинок в своей деятельности по разработке и распространению прогрессивных приемов технологии производства и использования отечественного минерального и сельскохозяйственного сырья. Такого же рода работу вели его современники и коллеги, как по Академии наук – академики Т.Е. Ловиц, Я.Д. Захаров, И.Ф. Гмелин, К.Г.С. Кирхгофф, так и другие ученые России. ***Химико-технологическое и химико-аналитическое направления становятся характерными для развития химии во всех ведущих странах Европы и, особенно, в России.*** Фундаментальные работы В.М. Севергина по минералогии – «Первые основания минералогии» (1798 г, где впервые прозвучали термины – *технологическая и экономическая минералогия*) и «Опыт минералогического описания Российского государства» (1809) являются итогом его глубокой и всесторонней деятельности. Среди его работ в области технологии следует особо выделить отмеченный выше учебник «Начертания технологии минерального царства» и статью «Краткое обозрение начала, успехов и пользы технологии» (Технол. журн., 1804, т. 1, ч. 1). В 1807 г, подчеркивая особую роль химической технологии в предисловии к Минералогическому словарю, он писал: «…когда особливо химия, сия верная путеводительница всех физических наук, новыми озаренная лучами, *пролила свет свой на саму минералогию*, тогда содеялась она наукой твердою, постоянною, основательною, полезною фабрикам, ремеслам, художествам и искусствам, новые способы к удовлетворению нужд человеческих открывающею» (т.1, с.IY).

### Этап II. Накопление информации о свойствах минералов для оценки полезных ископаемых (1830–1920 гг)

После ухода из жизни В.М. Севергина (1826 г) и прекращения издания «Технологического журнала» стало постепенно размываться само понятие ТМ. Термин исчез из общего употребления в минералогической литературе, хотя в это время шло постоянное изучение разнообразных свойств минералов во взаимосвязи с их конституцией и генезисом. Как подчеркивал Н.П. Юшкин в работе [1]

*химические исследования до конца XYIII в., хотя и раскрывали существенно новые стороны строения минералов, не могли конкурировать по информативности с морфологическими и физическими.* Причем, химическое направление развивалось, как поисковое, по пути химического испытания минералов. С рубежа XYIII–XIX в существенно изменилась роль химических исследований в связи с открытием и утверждением количественных законов химии – постоянства состава, эквивалентов, простых кратных соотношений, стехиометрии, с созданием химической анатомии, с разработкой качественной, а затем и количественной аналитической химии, метода паяльной трубки, спектрального анализа. К точному знанию химизма нескольких сотен минералов привело развернувшееся изучение их химического состава (М. Клапрот, Э. Лаксман, Н. Воклен, Т.Е.Ловиц, И. Гадолин, С. Теннант, У.Гатчет, В. Волластон, И. Берцелиус, Ф. Штромейер, И. Арфедсон, Г. Розе, К. Мозандер, Г.И. Гесс, Р. Герман, Р.И. Евреинов и многие др.). *Это позволило выявить целый ряд закономерностей взаимосвязи между химическими и другими свойствами минералов.* Периодический закон Д.И. Менделеева раскрыл новые возможности по входящим в состав минералов элементов, позволяющие предсказывать их свойства. Утвердились идеи, высказывающиеся ранее в связи открытием Э. Митчерлихом явлений изоморфизма (1819) и полиморфизма (1822), о взаимосвязи состава и формы минеральных индивидов, существенно изменились взгляды на химическую конституцию минералов. ***В XIX в произошла полная химизация минералогии***. Это нашло отражение в химической классификации минералов (И. Берцелиус, Д.И. Соколов, Д. Дана, Г. Розе и многие др.), и *минерал стал рассматриваться в первую очередь как химическое соединение, а минералогия – как химия земной коры.* В 1838 г появился термин «геохимия» (Х.Ф. Шенбейн), а в первое десятилетие XX в из химического направления минералогии *выделилась геохимия* (Ф.У. Кларк, В.И. Вернадский, В.М. Гольдшмидт, А.Е. Ферсман и др.) – наука о свойствах, распределении и поведении атомов химических элементов в земной коре. В 1915 г А.Е. Ферсман ввел понятие «генетическая минералогия», а несколько раннее Е.С.Федоров - *термин «кристаллохимия минералов»*. В то же время химические свойства минералов в их диагностике выступали как ведущие почти до середины XX в, предопределяя основные черты технологии большинства типов руд.

Несмотря на то, что термин В.М.Севергина – «технологическая минералогия» на этом этапе не использовался, само содержание направления ПМ пополнилось весьма значимыми характеристиками о свойствах минералов, их кристаллохимии и генезисе для руд различных формационных типов. Несомненно, *минералого-технологические исследования великого ученого и его последователей во многом предопределили будущее ТМ, связанное с развитием морфолого-структурного, кристаллохимического и генетического направлений в минералогии при оценке обогатимости различных видов МС.*

**Этап III. Разработка основ геолого-минералогической оценки руд МПИ (1921–1955 гг)**

В 1920–1930-е годы остро встали проблемы ПМ перед молодым советским государством. В.И.Вернадский (1927) особо подчеркивал необходимость обеспечения высокого уровня в изучении МПИ вопросов ПрМ в широком понимании. Если на **этапе II** основное внимание уделялось поиску, прежде всего, химико-металлургических характеристик сырья, то с **III этапом** связано *становление уже в 30-ые годы научного минералого-технологического направления на новом уровне, которое состоялось в связи с внедрением в Институте прикладной минералогии (ныне ВИМС) метода Н.М. Федоровского по комплексному исследованию и* освоению промышленностью новых видов МС при совместной работе геологов, геохимиков, обогатителей, химиков-технологов. *Н.М. Федоровский руководил институтом в период 1923–1937 гг.* Здесь активно проводился широкий комплекс исследований области ПрМ, под которой он понимал «…группу вопросов и проблем, тематика которых связывает минералогию с промышленностью, сельским хозяйством и бытом» [4]. В основу метода положено изучение собственно минерала (*детальное минералогическое изучение физических, физико-химических и технологических, всех практически ценных, свойств выявленного МС; разработка новых методов исследования; установление минералогических критериев для поисков и оценки масштабности МПИ*). Впервые в его работе бала дана характеристика полезных свойств 400 минералов, которые использовались

в различных отраслях народного хозяйства страны. ***Метод обеспечивал создание наиболее рациональных технологических схем обогащения и переработки МС***. В итоге в 20–30 гг прошлого столетия в СССР были созданы асбестовая, графитовая, слюдяная промышленные отрасли, организовано производство каменного литья, природных адсорбентов, новых строительных материалов, минеральных абразивов, красителей, криолита, фтористых солей и др. ВИМС провел переоценку многих полиметаллических, редкометалльных, плавикошпатовых месторождений; организовал добычу серы на месторождениях Шор-Су, Гаурдак, Серные бугры; усовершенствовал переработку солей в заливе Кара-Богаз; подготовил сырьевую базу для Магнитогорского и Балхашского металлургических комбинатов, Славянского химического комбината; внес существенный вклад в создание сырьевой базы и в разработку для отечественной алюминиевой промышленности и ряда других производств [5]. В этот период много внимания уделялось методическим и теоретическим разработкам в связи с совершенствованием менералого-технологических методов исследования ПИ. Так, в 1930–1954 гг. В.А. Глазковским, В.В. Доливо-Добровольским, П.П. Соловьевым были охарактеризованы отдельные теоретические и практические положения проблемы минералогического исследования ПИ как объектов обогащения; выявлены взаимосвязи минерального состава и текстурно-структурных признаков руд с технологическими свойствами и показателями обогащения различными методами руд черных, цветных, редких металлов. Еще в 1946 г В.В. Доливо-Добровольским и В.А. Глазковским [6] была предложена классификация по размерам включений и выделений минералов и их агрегатов для технологической оценки руд. При этом они подчеркивали, что *сама по себе* величина включений и агрегатов еще не решает вопроса о применимости для обработки руды того или иного технологического процесса, т. к. это лишь необходимое условие возможности применения данного процесса. Поэтому в классификации отмечена зависимость между технологическими процессами и размерами минеральных включений.

**Н.М. Федоровский –** ***доктор геолого-минералогических наук, профессор***

Наиболее полно и системно В.А. Глазковским были изложены в монографии «Геолого-минералогические основы технологической оценки руд месторождений железа» на примере Fe руд Урала различных генетических типов [7]. В работе, наряду с общегеологическими характеристиками руд, рассмотрены в комплексе важнейшие технологические вопросы, такие как: геологические факторы технологической оценки; задачи и методы изучения вещественного состава; требования металлургии к Fe рудам; характеристика руд различного генезиса с учетом факторов, определяющих их основные технологические свойства; задачи методов исследования руд; текстурные и структурные особенности, как важнейший фактор определения технологических свойств руд; основы технологического опробования железорудных месторождений. Несомненно, эта работа явилась хорошим подспорьем для геологов и технологов в решении конкретных практических задач в связи с геолого-минералогическим изучением при технологической оценке не только Fe руд, но других видов ПИ.

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

Гиредмет и др.). В них проводились первые исследования по ТМ многих ПИ, разрабатывались первые технологические схемы, учитывающие взаимосвязь геолого-минералогических факторов (ГМФ) с обогатимостью и получением конкретных показателей обогащения. Здесь же накапливалась определенная геолого-минералогическая информация по вещественному составу, текстурно-структурным признакам, физико-механическим свойствам различных генетических типов руд; механическим, физико-химическим и металлургическим методам их переработки. В конечном итоге сформировался определенный опыт по минералого-технологической оценке (МТО) разных типов руд в связи с их обогатимостью; начали разрабатываться банки данных по МТО руд различных генетических типов и формаций. Это позволило сформулировать идею о том, что каждый генетический тип руд имеет свои определенные минералого-технологические характеристики. В то же время еще в 1954 г. А.И. Гинзбург в рамках поисковой минералогии (ПМ) 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.*** *При этом он подчеркивал, что* ***не существует минералов, не имеющих практического значения; мы просто не умеем еще все их использовать.***

Наряду с институтами, во всех территориальных геологических управлениях Мингео СССР существовали специальные минералогические лаборатории, в которых проводились исследования по изучению вещественного состава проб руд в связи с их МТО при геолого-разведочных работах (ГРР). Часто это проходило в тесном контакте с работами институтов.

*В этот период были обозначены основные методические подходы, необходимые для минералогического обеспечения работ обогатителей.* При оценке руд требовалось: установить количественный минеральный состав руд, продуктов и концентратов; изучить химический и гранулометрический состав рудных минералов; составить баланс распределения полезных компонентов по минералам; осуществить контроль протекания тех или иных технологических процессов и т.д. ***При этом*** **минералоги решали в основном аналитические задачи и «обслуживали» технологов** ***в рамках понятия И.Н. Плаксина*** **[8] – обогатительная минералогия (ОбМ).** Сам же термин ТМ практически растворился в более широком понятии ПрМ, по В.И. Вернадскому и Н.М.Федоровскому. И, тем не менее, необходимо подчеркнуть, что именно **Н.М. Федоровский положил начало созданию московской школы ТМ ВИМСа** в связи с геолого-разведочными работами (ГРР) в тесном контакте с геологами и технологами. Ее достойно и успешно развил со своими учениками и соратниками А.И. Гинзбург, существенно углубив и расширив задачи ТМ и, прежде всего, в связи с ГРР. **Сегодня эта школа является одной из ведущих далеко за пределами России.**

**Этап IV. Внедрение принципов ТМ в практику ГРР и горнорудного производства (1956–1982 гг),** которые использовались в ПМ и оценке различных генетических типов ПИ. Они же нашли конкретное решение в практике работы крупнейших ГОКов страны (в частности, *железных руд* – на Южном, Ингулецком, Ново-Криворожском, Центральном и Северном – в Криворожском бассейне; Соколовско-Сарбайском – в Северном Казахстане; Ковдорском и Оленегорском – в Мурманской области; Качканарском – на Среднем Урале; и марганцевых руд – в Никопольском и Чиатурском бассейнах) и др. *Следует особо подчеркнуть, что на каждом предприятии перед геологами и технологами встали серьезно вопросы по: достоверности минералого-технологической информации в оценке руд при разведке и эксплуатации месторождений; технологическому опробованию; выявлению причин расхождения проектных и фактических минералого-технологических показателей обогащения; выявлению и изучению ГМФ, определяющих обогатимость руд различных генетических типов; целесообразности и необходимости минералого- и геолого-технологического картирования* (МТК и ГТК) *месторождений*. Особенно остро это прозвучало в 50–60 гг, когда в Криворожском бассейне началось обогащение магнетитовых кварцитов – одного из важнейших и перспективных промышленных типов железных руд.

В 1956 г. на базе Скелеватского Магнетитового месторождения Кривбасса была пущена 1-я очередь Южного ГОКа (ЮГОКа) с производительностью обогатительной фабрики (ОФ) по сырой руде 16 млн т в год. Однако сразу же стало очевидно, что получить проектные показатели обогащения и, прежде всего, с качеством концентрата Fe=64% и хвостами по Fe=12% не удается. По секциям фабрики содержание Fe в концентрате и хвостах изменялось в пределах соответственно 59–62% и 15–18%. Было установлено, что магнетитовые кварциты (бедные руды с содержанием Fe=34–37%) месторождения неоднородны и труднообогатимы, а схема обогащения и прежде всего по крупности измельчения не отвечает природе руды. Особенно четко это проявилось при обогащении руд различных уступов карьера, существенно отличавшихся как по минеральному составу, текстурно-структурным признакам, так и по физико-механическим свойствам, что в конечном итоге сказывалось и на особенностях их обогатимости. В этот период (1958–1965 гг) автор статьи работал на комбинате в должности старшего петрографа (минералога) при главном геологе. Геологическим Управлением МинЧермета СССР такая должность была введена на ГОКе впервые. В контакте с геологами, горняками, технологами пришлось решать целый комплекс задач по оценке вещественного состава бедных магнетитовых руд, поступающих на ОФ *на основе методологии выявления основных* ГМФ, *определяющих конкретные технологические характеристики и показатели обогащения руд с учетом их неоднородности*. При проведении ГТК руд месторождения нами была разработана система из **двух групп ГМФ [9]: *1) общегеологических и 2) минералого-петрографических и химических.* 1-я группа факторов** (*стратегический уровень* оценки и прогноза обогатимости) **опирается на генетическую природу руд** (характер и глубину метаморфизма толщ, преобразования их при метасоматозе и гипергенезе) **с учетом особенностей их геолого-структурной позиции. Вторая группа (***тактический уровень* оценки обогатимости) обеспечивает количественные показатели обогатимости руд в рамках конкретной технологической схемы их переработки. Весьма значимыми здесь становятся связи поведения рудных и нерудных минералов (измельченных до различной крупности) в технологической схеме как на стадии рудоподготовки, так и в режиме различных приемов сепарации и концентрации**.** Также удалось выявить при изучении срастаний минералов с учетом их физико-механических свойств особенностей раскрытия; изменчивости природных свойств минералов при измельчении с образованием тонких фракций и формированием флокул, осложняющих режимы сепарации и концентрации минералов различной гранулометрии. В результате углубленного изучения вещественного состава руд месторождения с учетом минералого-технологических данных детальной и эксплуатационной разведки впервые было проведено ГТК руд месторождения. С использованием разработанной нами диаграммы изменчивости состава руд [по зависимости между коэффициентами магнитности ($К_М$=$Fe_{МГ}$**:**Fe) и окисленности ($К_{ОК}$=$Fe_2O_3$**:**FeO+$Fe_2O_3$)]; и минералого-технологической классификации были выделены в толще железистых кварцитов горизонта $К_2^{4Ж}$ средней железорудной свиты основные минералого-технологические сорта руд с учетом содержания в них, кроме магнетита, также гематита, Fe-содержащих карбонатов и силикатов. На базе карты были отстроены геолого-технологические планы добычных горизонтов карьера, с помощью которых осуществлялось усреднение 4-х основных сортов руд при подаче их на ОФ. В целом, информация о проведенных работах на ЮГОКе отражена в многочисленных статьях и монографии автора «Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов» [9]. В конечном итоге все новые материалы по выявлению закономерностей изменчивости минералого-технологических особенностей бедных магнетитовых руд были использованы институтами Механобр и Механобрчермет при последующих реконструкциях технологических режимов на ОФ комбината в связи с совершенствованием технологии их измельчения и обогащения.

В этот период весьма значимой для оценки роли текстурно-структурных признаков в связи с обогатимостью руд *становится проблема изучения* типов срастаний минералов. Наиболее полно она была рассмотрена нами на примере железистых кварцитов [9]. Выделены 4 типа срастаний:

1. *субидиоморфные* и *ксеноморфные*;

2. *пойкилитовые* – с подразделением по размерам включений на *крупновкрапленные* (размер вкрапленников 0,05–0,07 мм), *средневкрапленные* (0,03–0,05 мм) и *тонковкрапленные* (0,01–0,001 мм и менее). Форма вкрапленников обычно округлая или идиоморфная в разной степени. Кроме размеров, вкрапленность подразделяется на *равномерную* или *весьма неравномерную*, а по интенсивности - на *весьма интенсивную* (в ср. 75% площади зерна или агрегата занято вкрапленниками), *интенсивную* (50%), *среднюю* (25%) и *редкую* (10%). Этот тип срастаний образует при измельчении различные типы сростков в той или иной степени, осложняющие сепарацию измельченной руды;

3. *мирмекитоподобные* – напоминают субграфические структуры (например, магнетит или гематит с кварцем). Этот тип срастаний существенно осложняет процессы сепарации за счет формирования «трудных» сростков;

4. *особые формы срастаний, обусловленные замещением* минералов. Этот тип срастаний наиболее сложный для изучения и требует весьма внимательного генетического подхода, так как порождает при измельчении руд разнообразные типы сростков, существенно сказывающиеся на эффективности разных процессов сепарации. *В целом изучение типов срастаний с учетом генетической природы руд при оценке показателей раскрытия минералов обеспечивает не только контроль эффективности их обогащения, но и позволяет определить перспективы совершенствования технологии*.

Как показала практика изучения руд, ценный компонент нередко входит в состав нескольких рудных минералов и поэтому не может быть полностью извлечен при обогащении или ценный минерал представлен весьма тонкими выделениями (менее 100 мкм) и руда плохо обогащается. Особенно это прослеживается при использовании флотации, как универсального метода обогащения ПИ, обеспечивающего селективную сепарацию минералов. И.Н. Плаксин [8] подчеркивал, что многие задачи в изучении вещественного состава методами ОбМ, связаны с использованием достижений геохимии, кристаллохимии, химии и физики твердого тела, взаимосвязей структурных и генетических особенностей минералов с различными режимами флотации. Так, в монографии В.А. Глембоцкого и Г.М. Дмитриевой [10] показано влияние генезиса сульфидов на их флотационные свойства; приведен анализ различий и сходства адсорбционных, флотационных, химических и других особенностей, в частности, образцов галенита во взаимосвязи с их генезисом. По экспериментальным материалам дана генетическая классификации галенитов разных месторождений с учетом их флотируемости. *Это позволило авторам утверждать, что по данным минералогического, химического анализов и технологического эксперимента возможно обеспечить решение вопросов технологии обогащения руд и прогноза флотационных свойств и реагентных режимов для минерала еще до разработки месторождения*.

На **IV** этапе в различных институтах и производственных организациях значительно активизировались работы по МТО руд. Так, в институте Механобрчермет (1966 г.) состоялся Всесоюзный семинар рудничных геологов ГОКов МинЧермета СССР с широким участием также минералогов, технологов, работников НИИ и Вузов, посвященный проблемам изучения вещественного состава и технологических свойств железных руд различных генетических типов [11]. Участники семинара обменялись мнениями по различным аспектам проблемы при посещении карьеров ГОКов и геологических партий Кривбассгеологии, познакомились на практике с геолого-технологической документацией при эксплуатации и разведке, с принципами и подходами к усреднению руд на базе ГТК (разрезов, планов по уступам карьеров). В лабораториях института Механобрчермет и на производстве они также ознакомились с комплексом современных методов и аппаратурой, применяемых при изучении минералого-технологических особенностей руд и оценке их обогатимости. Это был знаковый семинар для решения многих вопросов по проблеме. Позднее (1976 г, [12]) с учетом материалов семинара и разработок институтов – ВИМС, Механобрчермет, Уралмеханобр, Механобр была издана обобщающая монография по изучению вещественного состава и обогатимости железных руд различного генезиса. В ней обозначены требования

промышленности к качеству руд, дано описание вещественного состава и обогатимости главнейших их промышленных типов, методов и методик изучения минерального, химического и фазового состава, а также физических и физико-механических свойств. Описаны методики исследования обогатимости руд и составления ГТК, требования к отбору технологических проб и продуктов их обогащения. Изложены задачи по изучению вещественного состава и обогатимости руд на разных стадиях поисков и разведок.

В 60–70-е годы в связи с бурным развитием промышленности страны встал вопрос о расширении возможностей использования в народном хозяйстве, наряду с черными, руд цветных и редких металлов в решении проблемы их комплексной переработки МС. И, как подчеркивал А.Ф. Ли, *«экономическая целесообразность добычи руды – эксплуатации месторождений полезных ископаемых – может быть определена только после тщательного изучения вещественного состава руды, технологии ее обогащения и возможностей ее металлургической переработки…Вещественный состав руды, с одной стороны, определяет ее ценность и пригодность для промышленности и, с другой, – методы обогащения и металлургической переработки»* [13]. Во втором издании книги А.Ф. Ли «Минералогическое исследование руд цветных и редких металлов» были обобщены исследования многих организаций по проблеме: основные задачи минералогического исследования: значение текстурно-структурных характеристик руд и прежде всего размера зерен минералов, их химического и минерального состава, форм нахождения ценных компонентов и некоторых других факторов для выявления технологических особенностей руд. Приведены сведения о химических, физических, физико-химических, оптических и других методах изучения вещественного состава МС. Охарактеризованы методы концентрации и выделения минеральных фракций, а также подсчета количественного минерального состава руд. Для наиболее характерных типов руд цветных и редких металлов (Pb, Cu, Al, Au, Mo, W, Sn и др.) приведен рекомендуемый комплекс методов изучения их вещественного состава в связи с оценкой обогатимости. В приложениях к работе приведены сведения по разнообразным характеристикам пород и руд в связи с их минералого-технологическим изучением и оценкой.

На протяжении всего **IV** этапа развитие ТМ различных видов ПИ проходило в рамках ПрМ (без использования самого термина). Только в 1974 г термин вернулся в направление минералого-технологических исследований в связи с появлением статьи А.И. Гинзбурга и И.Т. Александровой [14]. ***«Технологическая минералогия – новое направление минералогических исследований».*** В ней авторы подчеркивали, что ТМ фактически является частью прикладной минералогии, в понимании Н.М. Федоровского. ***К основным задачам этого раздела минералогии они справедливо отнесли исследования, направленные на более полное и комплексное использование МС.***

В 60–80-е гг XX в получили широкое развитие различные научные направления ПрМ, выдвинутые, разработанные и реализованные под руководством А.И. Гинзбурга в геологоразведочной практике, что нашло отражение в монографии 1981 г. «Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ» [15]. В книге были отражены следующие вопросы: *современные представления о реальных минералах; выявление новых видов минерального сырья; учение о типоморфизме минералов и методы изучения их типоморфных особенностей. поисковая минералогия; технологическая минералогия.* Затронутый комплекс проблем позволил четко увязать их с практикой ГРР в целом и конкретными решениями в ТМ, обозначив роль минералогии.

В 1970 г. в Криворожском горнорудном институте активно начала функционировать научная школа по ТМ (Пирогов Б.И.), получившая в 80-ые годы статус украинской школы. Минералого-технологические исследования руд Fe, Mn, Cu и других видов МС, как правило, были связаны с изучением их вещественного состава на крупных ГОКах страны с проведением ГТК месторождений, внедрением в комплексе современных методов анализов изучения исходных руд и продуктов их передела с использованием онтогении минералов (ОМ) Д.П. Григорьева с учетом эволюции изменчивости ТСМ в ЕГТС [16]. Исследования проводились в контакте с геологами и технологами предприятий и их результаты непосредственно внедрялись в

производство (в частности, железных руд – на Южном, Ингулецком, Ново-Криворожском, Центральном и Северном – в Криворожском бассейне; Соколовско-Сарбайском – в Северном Казахстане; Ковдорском и Оленегорском – в Мурманской области; Качканарском – на Среднем Урале; марганцевых руд – в Никопольском и Чиатурском бассейнах; медно-порфировых руд – Эрденета в Монгольской НР и др.). Была разработана специальная программа курсов лекций и лабораторных занятий по ТМ и ГТК, которые читались для студентов геологических специальностей и обогатителей; на курсах повышения квалификации геологов и технологов ГОКов МинЧермета СССР. Школой было подготовлено более 30 кандидатов и докторов геолого-минералогических наук; были изданы пособия и рекомендации по курсам дисциплин, которые также читались во Львовском Университете и периодически в ряде других институтов.

В 1982 г. большая группа ученых и производственников МинГео, МинЧермета, МинЦветмета, МинВуза СССР была удостоена Премии Совета Министров СССР по внедрению метода ГТК в минералого-технологическую практику оценки руд различных генетических типов.

В этот и последующие периоды постоянно шло обсуждение содержания основных понятий проблем минералого-технологического направления по оценке руд различных генетических типов. Так, В.З. Блисковский в публикации 1975 г [17] детально обосновал суть понятия ОбМ, считая его составной частью предложенного им более широкого термина технологическая минералогия (параллельно с работой [14]). При этом переработка МС в общем случае представляет собой двухстадийный процесс; 1) обогащение руды и получение концентрата (ОбМ, по И.Н. Плаксину [8]); 2) переработка последнего (химическая, металлургическая и т.п.) в конечный продукт (техническая минералогия и петрография, по Д.С. Белянкину – ТхМ-П, предложенная еще в работе 1952 г [18]. Оба подразделения рассматриваются автором как два самостоятельных направления ТМ. «Обогатительная минералогия изучает руды, технологические, лабораторно-технологические и т.п. пробы, которые в усредненном виде представляют минералого-химические черты крупных геолого-промышленных тел. Предназначение изучаемого материала для промышленного использования обусловливает и особый методический подход к исследованию и до известной степени специфику минерального состава» [17].

**Рассматривая ОбМ в основном как минералогию измельченной руды**, В.З. Блисковский подчеркивает ряд ее специфических особенностей:

– определяя роль текстурно-структурных и гранулометрических характеристик руд, ***необходимо оценивать их с позиций дробления и измельчения***. При этом следует проследить, как отражаются структурно-текстурные характеристики в частицах измельченной руды. Гранулометрический состав определенного помола руды определяет ее склонность к переизмельчению и зависит от прочностных свойств минералов, и ихагрегатов и структурно-текстурных соотношений между ними, ***имея чисто технологический смысл***;

– принципиально важно изучать минеральный и химический состав различных классов крупности измельченной руды, которые учитываются при выборе схемы рудоподготовки и метода обогащения;

– минеральный состав руды *предстает* в ОбМ *как переменная величина* – функция степени измельчения. Химический состав именно *реального минерала* рассматривается как предельный по отношению к концентрату;

– минеральные формы того или иного полезного компонента оцениваются и с позиций последующей переработки концентрата.

– количество и характер сростков есть основной из минералогических факторов обогатимости. При этом сросток рассматривается как специфический объект ОбМ;

– свойства минералов изучаются *как физическая основа* разделения с учетом их специфики. При рудоподготовке и обогащении свойства минералов не остаются постоянными и под влиянием различных физических факторов могут существенно меняться: *при механическом диспергировании* наблюдается изменение структурных свойств и состояние поверхности, увеличивается реакционная способность минералов – резко интенсифицируется химическое взаимодействие минеральных

компонентов: многие из них при сверхтонком измельчении претерпевают полиморфные превращения, дегидратируются или даже разлагаются;

– при радиационном, термическом, ультразвуковом и т.п. воздействиях на руду или рудную пульпу прослеживаются определенные изменения кристаллической структуры и свойств минералов;

– определенные изменения, как в фазовом составе, так и свойствах поверхности минералов могут быть связаны с взаимодействием руд и отдельных минералов с водой, воздухом, флотореагентами (растворение, выщелачивание, окисление, в том числе, при участии бактерий; процессы гидратации – с электрическими свойствами поверхности минеральных частиц и водной среды и др.). Новоприобретенные, как и естественные свойства минералов могут использоваться для сепарации;

– результаты обогащения зависят как от свойств самой руды, так и от выбранной принципиальной схемы и аппаратурного оформления процесса. При оценке особенностей их изменчивости на месторождении проводится картирование с выделением типов и разновидностей руд с учетом технологической характеристики. В основу выделения типов и разновидностей руд могут быть положены 3 группы факторов: а) технологические свойства; б) вещественный состав; в) геолого-генетические особенности. При этом ОбМ выступает как связующее звено между геологией и технологией полезных ископаемых.

Несомненно, В.З. Блисковскому удалось дать достаточно полное обоснование *понятию* ***ОбМ***, что способствовало поднятию в целом уровня минералого-технологических исследований руд при оценке обогатимости.

Весьма значимым моментом в развитии проблемы минералого-технологического подхода к исследованию руд явилось появление в 1962 г книги известного немецкого минералога П. Рамдора «Рудные минералы и их срастания». Он впервые широко осветил зарубежный опыт подхода к проблеме в специальной главе «Значение срастания минералов для обогащения», выразив суть проблемы в следующей фразе: ***«подвергнуть ли руду механическому разделению, флотации после тончайшего размельчения, амальгамации, выщелачиванию или металлургической переработке, часто возможно решить после полного и тщательного изучения одного шлифа, в то время как без этого понадобится много бесполезных, отнимающих время и требующих затрат экспериментов»*** [19]. Здесь явно звучит мысль, с одной стороны, о прямой зависимости технологических решений глубины изучения вещества руды, с другой, – от уровня знаний исследователя. По мнению Рамдора, ***именно изучение*** **формы срастания** ***может дать ответ на многие вопросы, связанные с обогащением руд:*** о количестве сростков минералов при какой-либо избранной крупности измельчения, а величина срастаний, установленная статистически, – непосредственно указание на минимальную крупность измельчения. Поведение плоскостей срастания показывает (но не всегда), будут ли при этом зерна минералов раскрыты. Значительное увеличение количества сростков потребует дальнейшего измельчения. Все эти данные, несомненно, связаны между собой самым тесным образом. Именно в срастаниях, сочетающих в себе элементы текстурно-структурных и минеральных компонентов руды, он видел ведущий параметр конкретных технологических решений ее переработки.

Рассматривая зарубежный опыт в целом, П. Рамдор отмечает, что обогатительные фирмы нередко держат в секрете результаты исследований минералогии руд по взаимосвязи с их обогатимостью. В то же время, как он справедливо подчеркивает «***почти каждая обогатительная проблема…требует особой методики по ходу работы*****: общих решений дать нельзя. Необычайно важное, даже решающее в одном случае, может представлять в другом случае излишнюю работу»** [19]. За основу обобщений автор взял преимущественно материалы американской и австралийской литературы с учетом его личных исследований. Обобщения Швартца по опыту минералогического изучения руд в связи с обогащением [19] включают ряд ведущих положений проблемы. Так, ***микроскопическое изучение в отраженном свете может дать заключение:*** о минералогической природе компонентов; о структурных и текстурных особенностях; о количественных соотношениях минералов; о генетических особенностях руд и

вытекающих из этого заключения о необходимом в будущем изменении обогатительного процесса (незначительные или сильные изменения в минеральном составе с глубиной). П. Рамдор детально рассмотрел с личных позиций каждый элемент системы Швартца. При этом он особо подчеркнул значение подготовки образцов для оценки технологических характеристик срастаний рудных и нерудных минералов (подготовка безрельефных шлифов для минераграфических исследований и возможности выкрашивания минералов включений за счет различий в твердости) с акцентом на их генетическую природу:

– парагенезис и физико-химические свойства соприкасающихся минералов, определяющие особенности их разделения при измельчении и обогащении;

– минералы сложного состава показывают в препаратах рудной микроскопии, что разделение их никогда не может быть полным за счет неизбежного количества промпродуктов со сростками. При этом особенно важно учитывать поведение благороднометалльной минерализации при измельчении и обогащении руд и ее взаимосвязей с различными минералами;

– различия в удельных весах носителей одного и того же металла при тонких прорастаниях могут обусловить промежуточные величины, позволяющие получать при гравитации различные результаты (например, в Mn рудах, что четко выявляется рудной микроскопией);

– удаление вредных примесей (например, носителей P и S в железных рудах, As и W в оловянных рудах, Bi в свинцовых рудах) важно увязать с их генезисом – первичным и вторичным (например, согласно Швартцу, высокая S не может быть удалена из железной руды в связи с тем, что она связана не с сульфидами, а с сульфатами типа ярозита (возник за счет полного окисления сульфидов), который микроскопически легко может быть пропущен;

– важно удаление минералов, свойства которых затрудняют определенные методы обогащения (например, каолин и серицит при флотации; халькозин, почти исключающий цианидное выщелачивание и т.д.), что требует их диагностики и характера проявления;

– по многим позициям в рудах принципиально значимы количественные подсчеты: *размеров зерен и срастаний минералов*, что позволит установить наиболее благоприятные условия измельчения руды; *определение минерального состава руд в целом*, особенно в связи с необходимостью оценивать распределение полезных металлов среди рудных и нерудных минералов; *определение количества и характера распределения выделений минералов благородных металлов в сырой руде с учетом гранулометрии затруднено*, поэтому в решении проблемы помогают исследования продуктов обогащения; *часто возможны заключения о поведении парагенезисов и количестве рудного минерала в месторождении с глубиной.*

Завершая обзор по материалам книги Рамдора, следует подчеркнуть значимость его выводов для минералого-технологических исследований руд при обогащении и, прежде всего, в отраженном свете. Эта книга и сегодня представляет наиболее полные сведения о рудных и нередко сопутствующих им в парагенезисах нерудных минералах в отраженном свете, особенностях их конституции и свойств с акцентом на генетическую природу с учетом стадийности их изменений при различных процессах минералообразования. Именно это весьма значимо в МТО руд при обогащении.

Весьма интересная информация о связи рудной минералогии с обогащением руд приведена в работе 1961 г [20] Ю. Кэмерона, в которой подчеркивалось, что «стоимость микроскопических исследований обычно более чем окупается исключением бесполезных операций и разработкой технологии, согласованной со *специфическими особенностями* вещественного состава и структуры руд. Подобно Клеопатре Шекспира, *руды металлов бесконечны в своем разнообразии*. Имеется мало «стандартных» методов обработки, и технология успешна только в том случае, если она согласована с минералогией и структурой руды» [20]. В ней всесторонне рассмотрены особенности проведения минералого-структурного анализа руд и продуктов обогащения, предложены таблицы и диаграммы для оценки точности анализа. Показано, что оба вида анализа выполняются в качестве контроля при обогащении на любой стадии процесса и, прежде всего, на начальных стадиях измельчения. С их помощью

осуществляется периодический контроль операций для проверки эффективности извлечения или качества продуктов обогащения, а также для корректировки процесса обогащения. *В структурном анализе особое место отводится характеристике типов срастаний минералов и в том числе микросрастаниям.*

Несколько позже проявились работы Дж. Крейга, Д. Вогана [21] и М.П. Джонса [22], развивающие идеи ТМ (ПрМ) с использованием широкого комплекса методов минералого-технологического оценки вещественного состава руд. В первой работе подчеркивалась, как и в более ранних исследованиях П. Рамдора и Ю. Кэмерона, *для технологии значимая роль рудной микроскопии*: «**если дробление и измельчение руд необходимы для того, чтобы подвергнуть минералы растворению, то** *рудная микроскопия* **важна для оценки и контроля эффективности цианирования или кислотного выщелачивания**. Технология таких процессов относится скорее к области металлургии, а не обогащения, хотя термин ***«минеральная технология»*** **(mineral technology)** может охватывать оба процесса» [21]. Этот термин, несомненно, важен для понимания сути проблемы в целом. И здесь следует особо подчеркнуть, что в этой работе при характеристике ассоциаций минералов (с учетом генезиса) сопоставляются их природные структурные взаимоотношения с экспериментальными, полученными при изучении фазовых равновесий соответствующих систем. В ней *приводится геометрическая классификация структур руд* Амштутца [21] *на примерах характерных графических изображений типов срастаний рудных и нерудных минералов с акцентом на морфологические особенности их границ, определяющих возможности высвобождения зерен рудных минералов при дроблении. Наряду с типом и размером срастаний, морфология границ показывает, происходит ли разрыв более крупных частиц по границам зерен. По данным микроскопии можно также судить о роли относительно разрывов и трещинок в самих рудных минералах. Авторы подчеркивают, что такие структурные особенности влияют не только на процесс измельчения, но и значимы при обогащении руд методами флотации и выщелачивания.* К сожалению, ничего не говорится о твердости контактирующих минералов, что крайне важно для оценки степени раскрытия срастаний. *Достигнутая на каждой стадии дробления степень высвобождения минералов оценивается под микроскопом*,

Джонсом [22] при рассмотрении проблемы МТО руд акцентировано внимание на комплексировании современных методов изучения с учетом их возможностей и вопросами подготовки проб. Даны рекомендации по стадиям исследования, сопровождаемые конкретными примерами.

Характеризуя в целом зарубежный опыт МТО руд, следует подчеркнуть, что он освещается в основном с позиций преподавания ПрМ в вузе. Этот опыт весьма полезен в практике минералого-технологического изучения руд. В тоже время он показал, что за рубежом недостаточно известны работы многих исследователей нашей страны по различным аспектам ТМ.

### Этап V. Разработка методологии и теоретических основ ТМ для труднообогатимых видов ПИ (1983–2003 гг)

В 1982 г. в Ленинграде под эгидой АН СССР, ВМО, Министерства цветной металлургии, института Механобр и ЛОП НТО цветной металлургии прошел YI съезд ВМО. Во вступительном слове президента ВМО акад. А.В. Сидоренко был рассмотрен широкий круг вопросов, в котором он особо обратил внимание на тот факт, что «именно новые знания о минералах, тонких особенностях их конституции, текстурных и структурных особенностях руд могут послужить научной основой для совершенствования существующих и создания новых методов обогащения, гидрометаллургии и других технологических приемов, приведут в перспективе к созданию безотходной технологии». Он призвал членов ВМО в своей повседневной деятельности стать ближе к решению конкретных задач горно-обогатительных и перерабатывающих отраслей. Здесь же в докладе «Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых» В.И. Ревнивцев дал глубокий и всесторонний анализ поднятых на съезде геолого-технологических проблем, подчеркнув, что современный этап исследований связан с необходимостью освоения

месторождений труднообогатимых руд. Он акцентировал внимание на отсутствии достаточно эффективных технологий их переработки, необходимости разработки приемов более глубокого изучения в связи с обогатимостью их вещественного состава, т.к. эти руды тонкозернисты и требуют для раскрытия срастаний минералов более тонкого измельчения. Определяя значимость проблем ТМ, он подчеркивал, что «необходимо на базе современных квантово-механических представлений о строении вещества установить физическую сущность взаимосвязи технических и технологических свойств минерала с фундаментальными особенностями его конституции (составом и строением) и одновременно с характерными дефектами кристаллической решетки реального кристалла, обусловленными всей генетической предысторией, отображающей его индивидуальность. При этом теория должна быть направлена на выявление свойств ***минералов с целью расширения области использования минеральных продуктов или разработки более рациональных схем извлечения полезных компонентов***» [2]. С целью объединения усилий ученых и производственников по проблемам ТМ съезд принял решение о создании комиссии по **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ.** Возглавил комиссию директор Механобра В.И. Ревнивцев, который руководил ею в период 1983–1989 гг, а с 1989 по 2003 гг ее возглавляла В.М. Изоитко.

Именно на этом этапе значимое развитие получил технологический эксперимент, позволивший глубже разобраться в характере взаимосвязей вещественного состава и обогатимости руд, формировании и изменчивости ТСМ на разных стадиях рудоподготовки, измельчения и обогащения.

**ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ РЕВНИВЦЕВ** (1931–1989), чл.-корр. АН СССР – блестящий технолог, глубоко проникшийся идеями геологического цикла наук. Создал научную школу по разработке процессов разделения минералов с близкими свойствами на основе дефектов их кристаллической структуры. Разработал ряд новых научных направлений в технологии переработки твердых ПИ (рудоподготовка, селективное разрушение минералов, ТМ обломочных малых частиц, направленное изменение ТСМ, направленное превращение минералов), техногенного сырья и ресурсов Мирового океана с целью их комплексного использования.

**ВИКТОРИЯ МИХАЙЛОВНА ИЗОИТКО** (1934–2003), профессор, доктор геол.-мин. наук, зав. кафедрой технологической минералогии. Национальный представитель России в Комиссии по прикладной минералогии ММА. Большой вклад внесла в формирование нового научного направления в геологических науках, изучающее минералы как объекты переработки с помощью различных технологий и объединяющее все виды минералогических исследований с изучением ТСМ и руд.

*С самого начала своей деятельности комиссия* в качестве приоритетных обозначила развитие следующих научных направлений:

1. Разработка теоретических основ ТМ, позволяющих научно обосновать влияние состава, структуры и особенностей генезиса минералов на их технологические свойства.

2. *Изучение и оценка ТМ главнейших типов месторождений, как основы повышения технологических показателей обогащения.*

3. Проблема селективного разрушения минералов с целью повышения степени их раскрытия.

4. *Исследование ТМ обломочных малых частиц.*

5. Направленное изменение ТСМ, горных пород и руд с целью разработки рациональных схем извлечения полезных компонентов.

6. *ГТК руд месторождений ПИ различных генетических типов и установление количественных взаимосвязей между ГМФ, вещественным составом руд и их технологическими характеристиками с использованием ЭВМ и компьютерной техники.*

7. Подготовка научных кадров и преподавание в вузах страны курса ТМ и геолого-технологического картирования МПИ.

В состав первого бюро комиссии вошли ведущие ученые разных научных школ, что обеспечило возможность учесть решения широкого круга вопросов ТМ как по различным видам ПИ, так и особенностям подходов к исследованиям**. В целом была определена новая стратегия ТМ с учетом развиваемых ранее таких направлений,** как:

– интенсификация использования МС, повышение полноты и комплексности освоения месторождений, совершенствование системы их минералого-технологической оценки (МТО), обусловивших развитие безотходных экологически чистых технологий и разработку новых технологических аппаратов;

– совершенствование методов минералого-технологических исследований ПИ на основе современных достижений минералогии и технологии обогащения с внедрением методов МТК и ГТК, обеспечивающих прогноз обогатимости руд при разведке и эксплуатации месторождений; оценке и переработке техногенных ПИ;

– дальнейшее углубление теории формирования ТСМ с учетом онтогенического подхода и возможности их изменений при рудоподготовке и обогащении, позволяющих совершенствовать систему управления процессами переработки различных видов МС.

Для обеспечения соответствующего уровня ТМ необходимо было решение ряда организационных вопросов таких, как: привлечение минералогов и технологов НИИ всех ведомств, а также вузов страны под руководством АН СССР к решению наиболее важных и актуальных проблем ТМ; четкого определения объема вопросов и проблем, охватываемых ТМ; стандартизация требований и методологии изучения минерального состава различных типов месторождений; организация оснащения производственных минералогических лабораторий МинГео СССР и отраслевых технологических институтов серийным унифицированным оборудованием и приборами; создание для координации исследований в системе АН СССР и в отраслевых институтах базовых отделов и лабораторий ТМ; введение в учебных заведениях

горно-геологического профиля преподавания курса ТМ. По материалам сессии ВМО был издан сборник статей по ТМ важнейших промышленных типов месторождений [23], в которых рассмотрены результаты работ по изучению вещественного состава руд и типоморфных особенностей минералов в связи с их влиянием на технологические показатели переработки и роли ТМ в решении конкретных практических задач. **Исследования по различным направлениям ТМ приобрели четкий системный характер,** объединив усилия исследователей прикладных НИИ многих министерств, АН страны, геологов-разведчиков и работников ГОКов. В значительной степени этому способствовали достижения в разных областях науки и, прежде всего, в минералогии (кристаллохимия и физика минералов, учение об онтогении и фило гении, внедрение новых методов анализа вещества, топоминералогия и др.), обогащении, металлургии, горном деле и др. Они обеспечили дальнейшее углубленное развитие ТМ, разработку ее теоретических основ, внедрение конкретных достижений в производство. В разных городах страны систематически проводились совещания, семинары, школы по наиболее важным направлениям. **Основным объектом исследования в ТМ стал минеральный индивид и продукты его преобразования на макро-, микро- и нано – уровнях с использованием метода онтогенического анализа**, позволяющего рассматривать историю минералов, которая,…«начинаясь обязательно с акта зарождения объекта, далее составляется из полного набора событий, когда-либо свершавшихся в «жизни»… минеральных тел, индивидов и агрегатов, и не только в природе, а присоединяя к естественной истории ее продолжения – технологических событий в ходе добычи, обработки и переработки минералов, пока не наступит конец» [25]. Причем, как постоянно подчеркивал Д.П.Григорьев [24], **поведение минералов в системе «минерал–среда»**… «мало знать словесно, надо знать телесно», особенно с учетом более труднообогатимых руд. Следует также иметь в виду, что особенности онтогении минералов и их типоморфные признаки формируются и изменяются в природном и технологическом спектрах гранулометрии ([25] Пирогов, 1988). «Уже при дроблении и измельчении руд сказывается структура и текстура минеральных срастаний, т. е. онтогения агрегатов, а также процессы обогащения или переработки, в которых имеет место смачивание, адсорбция, адгезия, растворение или разложение и т. п., серьезно зависят от распределения химических примесей, включений, дислокаций и деформаций и других особенностей индивидов. Предопределяя физико-химические, технические свойства руд, эти качества минералов возникают при кристаллогенезисе и всех прочих явлениях онтогении» [16]. При изучении различных видов МС онтогенический подход с учетом технологического эксперимента обеспечивает:

а) оценку гетерогенности особенностей конституции (состава и структуры) минералов,

б) выбор оптимальных условий раскрытия зерен полезного компонента, отражая природу срастаний – гранулометрию, форму зерен срастающихся минералов, особенности границ и физико-механических свойств. Как показывают наши наблюдения [25], Т.С. Юсупова и др. [2004], особенности раскрытия минералов характеризуют пути повышения извлечения ценных компонентов руд на основе управления селективностью измельчения «с сохранением геометрической целостности раскрываемых минералов и их структурно-химических характеристик»;

в) оптимизацию технологического процесса с учетом контрастности свойств разделения минералов, неоднородности состава и свойств мономинеральных зерен (выявляются при комплексном минералогическом анализе анатомии индивидов и измельченных частиц);

г) исследования характера и направленности изменений тех или иных качеств минералов (ПИ, в целом);

д) определение последовательности технологических операций;

е) выделение при геолого (минералого) - технологическом картировании типов и сортов ПИ с получением их минералого-технологической характеристики, отражающей эволюцию типоморфных признаков как минералов, так и в целом ПИ.

Опираясь на особенности вещественного состава, текстурно-структурных признаков, физико-механических и физико-химических свойств ПИ различных генетических типов; законы минералогии – инерции – минералогической «памяти», резонанса, информационные; учитывая взаимосвязи и во многом подобие между процессами минералообразования (преобразования) в Природе и Технологии; данные технологических экспериментов, мы формируем наши представления о ТСМ и особенностях их типоморфизма.

Поэтому одним из путей решения проблемы переработки труднообогатимых руд на Y этапе стало углубленное изучение особенностей их вещественного состава с привлечением широкого комплекса современных физико-химических методов анализа и творческое использование новых знаний в области кристаллохимии, кристаллофизики и минералогии о природе вещества, а также проведение постоянных технологических экспериментов. Тем более, что «информация о свойствах минерала, основанная на кристаллохимических параметрах его идеализированной структуры, недостаточна для описания поведения реальных кристаллов в процессах обогащения. Только учет генезиса кристалла, всей эволюции его образования и характера возникающих в ходе этой эволюции несовершенств (дефектов) его структуры может дать объективные представления о его реальных технологических свойствах. Именно различием генезиса может быть объяснен тот факт, что одни и те же минералы из разных месторождений или разных участков одного и того же месторождения ведут себя при обогащении по-разному» [2]. Следует иметь в виду, что эволюционные закономерности развития минерального мира во взаимосвязи с живым веществом – минералы и их ассоциации; в целом состав, текстурно-структурные признаки и свойства ПИ, в том числе технологические, формируются в различных энергетических полях (гравитационных, магнитных, электрических и др.) ЕГТС на макро-, микро- и нано- уровнях. Они определяют основные факторы обогатимости с учетом минералого-геохимической и экологической специализации ПИ, отражая круговорот минерального вещества в Природе и Технологии на различных уровнях его организации: индивид (кристалл, зерно, частица) → агрегат (агрегат малых частиц) → рудное тело → минералогическая аномалия (отвалы пустых пород и некондиционных ПИ, хвостохранилища- техногенные МПИ)→ минералогическое поле… Развивая идеи Н.П. Юшкина о взаимосвязи между минералом и минералогенетической средой, следует считать их во многом общими и в технологической системе [26]. Однако, природные и технологические процессы в связи с пространственно-временными закономерностями их проявления существенно отличаются по кинетике и реакциям.

В 80-е годы в результате успешного развития ГРР по проведению планомерной геологической съемки и детальных поисков стало очевидно, что фонд легко открываемых месторождений с каждым годом уменьшается, а для освоения вновь открываемых МПИ в отдельных районах страны необходимо время и значительные затраты, поэтому остро встал вопрос о комплексном освоении минеральных ресурсов недр. Был предложен путь интенсификации развития производства и повышения его эффективности на основе глубоких качественных изменений [27] за счет:

– повышения извлечения из недр главнейших полезных компонентов, что равносильно открытию и освоению новых месторождений;

– полного комплексного использования всех полезных компонентов руд с разработкой безотходной технологии;

– повышения содержаний полезных компонентов в перерабатываемых рудах за счет изъятия из горной массы, подаваемой на фабрику пустых пород, что способствует как поднятию извлечения, так и повышению производительности обогатительных фабрик;

– создания более экономически рентабельных технологических схем переработки руд и концентратов, менее энергоемких, с использованием компонентов более дешевых и не загрязняющих окружающую среду;

– разработки комплекса мер, направленных на превращение ранее открытых и разведанных месторождений, оказавшихся забалансовыми, в промышленные;

– использования весьма перспективных геотехнологических способов (подземное и кучное выщелачивание и др.) для отработки бедных и весьма бедных месторождений, которые считаются забалансовыми;

– использования накопившихся в больших количествах на уже отработанных, законсервированных или длительно эксплуатирующихся предприятиях отвальных продуктов (отвалов, шламов, шлаков, кеков и др.), фактически техногенных месторождений, созданных благодаря человеческой деятельности;

– вовлечения в промышленное использование новых видов МС;

– создания на основе различных минералов и продуктов их переработки новых материалов с особыми свойствами.

На этой основе в марте 1986 г в Челябинске на базе Уральского дома НТП ВИМСом и Комиссией по ТМ при активном участии производственников было проведено Всесоюзное совещание **по проблеме *применение достижений ТМ для повышения эффективности использования МС*** на основе достижений науки и техники [28]. Были рассмотрены следующие актуальные аспекты проблемы:

– современное состояние, задачи и перспективы развития ТМ,

– вопросы комплексного использования сырья и создание безотходных технологий,

– минералогические критерии технологической оценки качества сырья,

– физико-химические закономерности в процессах обогащения руд и металлургического передела,

– минералого-технологическое картирование геологических объектов,

– направленное изменение технологических свойств минералов,

– методы, применяемые в ТМ,

– оценка экономической эффективности внедрения достижений ТМ в практику действующих предприятий.

Проблема направленного изменения *технологических и технических свойств* минералов при переработке труднообогатимых руд сразу же вышла в работе комиссии на одно из первых мест. В Механобре в 1984 г прошло совещание с широким обсуждением важнейших направлений проблемы [29]. В основу легли теоретические разработки и эксперименты по изучению особенностей раскрытия и близости ТСМ в срастаниях. На конкретных примерах было показано, что руда при направленном изменении из практически необогатимой преобразуется в нормально обогатимую. В.И. Ревнивцев подчеркивал, «*хотя техническое оформление процесса заимствуется из соответствующих технологий, механизм процесса по аналогии с природой строится по моделям, для которых характерна минимальная энергоемкость, высокая скорость и селективность*. Условия их можно подразделить так:

– механический метод превращения, являющийся своеобразным аналогом природных процессов тектонических воздействий;

– термохимическое или пирохимическое превращение (различные виды обжига, обжиг-спекание, ликвационная плавка), имеющие общие закономерности (хотя и далекие от прямых аналогий) с процессами магматизма и метасоматоза;

– гидрохимический метод превращения (например, автоклавная обработка), близкий к гидротермальным процессам;

– биохимическое превращение (бактериальное выщелачивание)» [29].

В опубликованных материалах рассмотрены вопросы направленного изменения технологических и технических свойств МС путем перестройки структуры минералов, создания дефектов кристаллов, изменения физических (оптических, магнитных, электрических) и химических свойств минералов. Показано, что при этом открываются широкие перспективы вовлечения в промышленное производство труднообогатимых и сложных по технологическим свойствам руд, а также освоения новых видов МС.

В 1985 г в Сыктывкаре по инициативе АН СССР и ВМО проходилось Всесоюзное совещание «Теория и методология минералогии» с рассмотрением путей развития теории минералогии, познавательных подходов к минералам, новых идей в конституции минералов, кристалломорфологии, генетической и прикладной минералогии [30].В докладе «Теоретические

основы технологической минералогии» [30] нами рассмотрены методология и теоретические основы ТМ в развитие идей В.И. Ревнивцева. Подчеркивается, что *методология ТМ связана с двойственной природой* ТСМ во взаимосвязи с конституцией и генезисом, *определяющих степень контрастности совместно встречающихся минералов*, и возможность их изменения под влиянием различных воздействий; *с формированием свойств в сложной природно-техногенной системе* **месторождение – фабрика – хвостохранилище**; *с изменчивостью свойств в широком спектре природной и технологической гранулометрии*; и *с возможностью их направленного изменения с целью повышения эффективности разделения; с проведением ГТК на основе типоморфных признаков обогатимости* минералов и руд.

В этот же период получили значимое распространение поднятые раннее идеи в связи с МТО разных ПИ МТК и ГТК с учетом геолого-структурного картирования МПИ. Они детально обсуждались еще в Миассе в 1983 г на III-ем Всесоюзном минералогическом семинаре [31] по вопросам методики и практики картирования ряда рудных районов и месторождений СССР, где были рассмотрены цели и задачи минералогического картирования (МК) разного масштаба. В качестве формулы МК А.Г. Жабиным предложены 3 аспекта: 1) выбор и иерархия картируемых элементов, 2) масштаб, 3) точность документации – качественная, приближенно-количественная и количественная; отмечена особая роль рисунка как основы МК. На конкретных примерах показана роль разных элементов картирования МПИ (кристалломорфология, состав и свойства минералов, ассоциации, текстурно-структурные типы агрегатов, степень проявления разнообразных наложенных процессов и др.). Отмечено, что МК эффективно на всех стадиях поисков, разведки и эксплуатации различных МПИ, что выявляемые закономерности в распределении минералов и их свойств, представленные в виде карт и схем, играют важную роль как в прогнозировании оруденения, так и в связи с минералого-технологической оценкой разных ПИ. В 1989 [32] подробно рассмотрены методологические и научные основы ГТК, при этом особое внимание обращено на содержание работ (принципы подхода и выбор элементов картирования) на стадиях детальной и эксплуатационной разведки. Приведена характеристика геолого-минералогических факторов, определяющих обогатимость основных геолого-промышленных типов месторождений железных и руд цветных металлов. Продемонстрированы конкретные примеры ГТК месторождений. О.П. Ивановым на основе топоминералогического анализа рудных месторождений в развитие идей Н.П. Юшкина по общим представлениям в области топоминералогии [33] и МК удачно систематизированы принципы и приемы изучения пространственно-временных закономерностей распределения минерального вещества в рудных месторождениях с целью решения основных задач их разведки: определения перспектив рудоносности и оценки технологического качества руд. Тем самым заложены основы топоминералогического анализа рудных объектов, включающего построение сводных возрастных парагенетических рядов, комплексное поисково-минералогическое и МТК для выбора стратегии и тактики работ. Объектом МТК служат рудные тела, а элементами картирования минералогические признаки, контролирующие технологическое качество руд. ***МТК обеспечивает выделение и геометризацию технологических сортов руд, а также контроль и представительность крупнообъемного технологического опробования, планирование горных работ и управление качеством добываемых руд, решение вопросов рационального использования их запасов.*** В основу должна быть положена минералого-технологическая классификация руд, основанная на выявлении взаимосвязей между параметрами их вещественного состава с конкретными технологическими показателями обогатимости. На МТК рудных тел должны наноситься не технологические данные, а результаты опробования. Для каждого генетического типа месторождений эта задача решается по-своему. При этом очень важна возможность в оценке запасов по технологическому качеству руд (ПИ) для сравнения с аналогичными типами месторождений.

В Криворожском горнорудном институте (1987 г) при активном участии ученых и производственников различных организаций СССР была проведена сессия Украинского

минералогического общества по проблеме «Онтогения минералов и технологическая минералогия» [34]. Д.П. Григорьев в докладе «Соотношение технологической минералогии с сопредельными отраслями знания» отметил взаимосвязь обоих направлений, указав, что «*переключение минералов в область ведения технологической минералогии должно начинаться с акта воздействия на руду горной техники при добычных работах, когда к природным особенностям минералов начинают добавляться качества техногенные, когда минералы подвергаются воздействиям механическим, тепловым, химическим, облучению, другим, изменяющим сильно, иногда совершенно свойства полезного ископаемого*. ***Только полный совместный учет природных и техногенных качеств открывает возможность рационального использования сырья и интенсивного ведения технических процессов***» [34]. Именно здесь значима роль онтогении, т.к. «*все качества минералов – состав, структура, физические и химические свойства, форма и величина – создаются в ходе их генезиса*» [16]. Практическое значение онтогении в ТМ особенно подчеркивалось еще в докладе В.И. Ревнивцева [2]. В тоже время во многих докладах на сессии УМО активно обсуждались пути использования онтогенической информации для решения проблем минералогии, повышения эффективности поисковых и разведочных работ; разработок по ТМ в связи минералогическим картированием и переработкой МС.

Важно, что широкое освещение различные аспекты ТМ получили в сборнике «Геолого-технологическая оценка рудных минералов, проб и месторождений» [35] для представления на Геологическом Конгрессе в Пекине. Опубликованные на английском языке материалы, как итог деятельности комиссии ВМО по ТМ, вызвали огромный интерес геологов и технологов за рубежом и получили высокую оценку.

В 1990 г. был опубликован Справочник «**Технологическая оценка** минерального сырья. (Опробование месторождений. Технологическая минералогия)» (Остапенко П.Е., отв. ред.) с использованием значительного количества материалов и научных разработок разных специалистов НИИ и лабораторий, ГКЗ СССР и ГОКов [36]. С учетом увязки обеих позиций проблемы и сформировавшегося опыта автор рассматривает широкий комплекс вопросов, в том числе, и в историческом аспекте, с акцентом на современное понимание. Он характеризует способы технологического опробования, подготовки проб к исследованию при разведке и геолого-промышленной оценке месторождений. При этом особо подчеркивается роль современных методов изучения свойств минералов и вещественного состава ПИ, обеспечивающих получение необходимых исходных данных для разработки технологии дробления, измельчения и обогащения. Дано описание оборудования и приборов, применяемых для отбора проб и проведения указанных исследований. Приведена классификация и типовой состав минерального сырья. Особо рассмотрены основные методы энергетического воздействия на физико-химические свойства минералов и на минеральное сырье.

В ВИМСе систематически проводятся совещания по различным проблемам ТМ (роль кристаллохимии в формировании ТСМ; ТМ в повышении эффективности использования МС; комплексное использование МС, направленное изменение ТСМ и др.). Интересно обобщены достижения института в развитии основных направлений ТМ в работе В.П. Борискина и Г.А. Сидоренко [37]. В ней отражены высокая эффективность ТМ в связи с экспрессной оценкой руд на ранних стадиях ГРР, вплоть до обоснования схем их переработки. Рассмотрены конкретные примеры рационального комплексирования современных методов исследования и направленного изменения свойств минералов для оптимизации схем обогащения. Рекомендованы следующие перспективные направления работ в области ТМ: *1. Технологическая оценка и прогноз обогатимости МС с получением количественных технологических показателей на базе минимального и достаточного объема экспериментальных данных на ранних стадиях ГРР с использованием экспрессных методов МТК для выделения наиболее перспективных участков. 2. Опережающее детальное и количественное изучение фазового состава руд, концентратов и составляющих их минералов*

*для обоснования схем технологического передела и оптимизации технологического процесса, в том числе на действующих предприятиях. 3. Направленное изменение ТСМ и руд с целью оптимизации процессов передела МС с минимальными дополнительными капитальными затратами. 4. Автоматизация технологического процесса переработки руд на основе минералогических показателей в масштабах действующих предприятий.* Постоянно происходило внедрение разработок ВИМСа в области ТМ через: организацию и проведение школ-семинаров и выставки на ВДНХ; проведение в институте занятий по повышению квалификации МинГео СССР при институте и обучение специалистов из различных организаций в его лабораториях; выпуск издательством «Наука» (по решению комиссии по ТМ при АН СССР серии монографий, в том числе с участием сотрудников ВИМСа.

Дементьева (Доливо-Добровольская) Г.И. разработала принципы и методологию структурно-размерного анализа диспергированных минералов (фаз) – обломочных малых частиц [38], позволяющих обеспечить поиск и установление причинно-следственных связей изменчивости свойств минералов при дроблении и измельчении руд (ПИ), как одного из важнейших положений ТМ. Эти материалы вошли в монографию «Технологическая минералогия обломочных малых частиц» 1992 г [39]. В ней обозначены теоретические основы нового раздела науки естественных и технических проблем познания – ТМ, в частности, связанные с комплексным использованием МС. Приведенный материал стал основой базы создания системы прогноза технологического поведения минералов той или иной конституции на различных этапах его переработки. Справедливо при этом замечание авторов – *симметрия творит явление* (основной вывод классической кристаллографии). Это четко реализуется в системах малых объектов. «Искусственно наведенный при различных воздействиях беспорядок, являющийся мощным аккумулятором избыточной энергии, создает целый ряд новых явлений, происходящих как цепь событий по пути к установлению порядка. Насыщенность структуры структуры дефектами и ее аморфизация в диспергированных минералах создают искажения симметрии…Вслед за этим начинается релаксационный период восстановления структуры. повышение симметрии. Процесс релаксации имеет дискретный характер, и каждая ступень на пути к порядку выполняет роль точки бифуркации в процессе упорядочивания и самоорганизации: идет цепная реакция взаимодействия структурных единиц разной масштабности от микроуровня структурных стереоэдров до макроуровня технологического процесса; экспериментальный материал показывает, что макропроцессы являются отражением реакций на микроуровне» [39]. Авторы подчеркивают, что выявление причин аномального поведения ОМЧ, дискретной изменчивости их свойств их свойств, инверсии активной фазы в пассивную при достижении закритических значений размерных, структурных, временных параметров позволяет создавать новые технологические операции как активации, так пассивности в ряде случаев (например, при транспортировке или сушке сыпучих материалов) минеральной шихты. Рассмотрены теоретические аспекты явлений механоактивации, механохими, определяющих поведение в технологии ОМЧ, а также возможности разработки динамической модели обобщенного алгоритма кристаллофизических параметров минерального сырья. Трудности прогноза поведения минералов в технологии заключаются в сложности связи между первичными (онтогенией) и вторичными (техногенез) характеристиками и их неаддитивностью. Приведенный в работе теоретический и экспериментальный материал позволяет выявить направленность и природу этой связи с учетом дефектоемкости, реакционной активности ОМЧ и их размерности.

Очень важные позиции ТМ были рассмотрены в 1993 г (АО «Механнобр-Техника» и АО «Механобр-Инжиниринг») по ГТО и переработке руд месторождений разных генетических типов [40]: различных аспектов комплексной оценки с учетом экономического подхода при ГТК и технолого-металлогеническом картировании рудных и нерудных ПИ; оценке комплексности МС разных техногенных месторождений; проблем использования оборудования для дезинтеграции МС и промышленных отходов, новых подходов к технологическим решениям, в том числе при проектировании в связи с технико-экономической оценкой горно-

обогатительного производства (селективное разрушение МС, гравитация мелких и тонких фракций, применение методов биотехнологии и др.).

В 1994 г появилась весьма интересная работа узбекских минералогов по проблемам *микроминералогии* – изучением выделений минералов менее 0,1 мм, свойства которых за счет размеров качественно отличаются от более крупных образцов. Это показано на примерах пирита при исследовании зависимостей **размер – свойства**, а также по результатам изучения микроминералогии Au-, Cu-Mo- и Pb-Zn- месторождений Чаткало-Кураминского региона с рассмотрением отдельных вопросов технологической переработки руд [41]. Авторы справедливо утверждают, что «любой минерал, достигая размера менее 150–50мкм, попадает в область новых закономерностей, определяемых резким возрастанием вклада поверхностных явлений по сравнению с объемными и становится обладателем новых свойств, качественно отличающих его от макровыделений. Он ***становится заметным термодинамическим фактором***, наряду с классическими температурой и давлением, приводя не только к изменению свойств у известных минералов и появлению своеобразных размерных модификаций, но и к возникновению микропарагенезисов, относимых к запрещенным с точки зрения традиционной минералогии, появлению новых минеральных разновидностей, не существующих в крупных выделениях в современных условиях» [41]. В работе реализована попытка систематизировать данные экспериментальных и природных наблюдений зависимости **размер – свойства** минералов под идеями новой парадигмы разрозненных представлений о малых частицах (ОМЧ), пылевидном веществе, тонкодисперсных или капиллярных геохимических системах и пр. При исследовании дискретного состояния вещества в рудных и техногенных системах [42] авторы наметили иерархическую систематику дискретного состояния вещества в ряду образований: ***минерал → микроминерал → квазикристалл → фуллерен → аморфное вещество → коллоиды → наночастицы → кластеры.*** Как показано во многих последующих исследованиях, этот ряд четко отражает эволюцию изменчивости ТСМ. И, наконец, наиболее полное представление о роли дискретного состояния вещества в ТМ дано в интересной монографии Р.И. Конеева по наноминералогии Au в эпитермальных МПИ Узбекистана [43], хотя она по времени публикация относится к YI этапу истории ТМ, ее основные идеи развивают общие идеи микроминералогии. С позиций методологии и методов нанонаук и нанотехнологий в современном направлении минералогии-наноминералогии изучены особенности самородного золота, его наноансамбли и микропарагенеэисы трех, наиболее развитых формаций в Чаткало-Кураминском регионе с учетом особенностей геологии и металлогении МПИ: Au-As, Au-Te, Au-Ag. Изложены современные представления о нанонауках и нанотехнологиях, основные понятия, объекты, методология наноминералогии и концепции «естественных нанотехнологий». «Понимая, что наноминералогия, как и многие другие нанонауки, находится только в начале пути, тем не менее следует подчеркнуть, что она уже сейчас оказывает влияние на традиционные, фундаментальные представления о кристаллизации, минералообразовании и формировании рудных концентраций» [43].

***Большой заслугой комиссии является целевое издание серии монографий по различным типам руд и направлениям ТМ***: ТМ железных (Пирогов и и др., 1988), гипергенных никелевых (Вершинин и др., 1989), вольфрамовых (Изоитко, 1989), оловянных (Иванов и дор., 1989), редкометалльных (Сидоренко и др., 1992); создание 3-х выпусков (1983, 1985 и 2000 гг) библиографического указателя «Технологической минералогии» – первых 2-х под редакцией В.И. Ревнивцева (составители Изоитко В.М., Самерханова К.И.) и 3-го под редакцией Д.В. Рундквиста (составители Изоитко В.М., Царева И.М. Эти материалы позволили составить четкое представление о публикациях по основным направлениям ТМ и послужили хорошим подспорьем при проведении дальнейших исследований. *Весьма значимой вехой развития различных проблем ТМ явилась книга 1997 г В.М. Изоитко* [44], в которой обобщен опыт известных материалов в области ТМ и оценки руд по следующим

направлениям: основные технологические процессы и схемы; особенности минералов и руд, определяющие их технологические свойства; методы изучения минералов и руд в ТМ; влияние геолого-минералогических особенностей руд разных генетических типов на показатели их переработки; геолого-технологическая оценка руд на разных стадиях ГРР; роль ТМ в управлении качеством руд и технологическими процессами. Ею предложены методики выделения природных и технологических типов по необходимому и достаточному количеству признаков, характеризующих руду (на примере месторождений руд – Cu-Ni, W, Mo, Sn, Cu, Au, Pt, полиметаллов). Показано, что итогом технологической оценки месторождений как промежуточного звена между их генезисом и результатами обогащения являются технолого-металлогенические и геолого-технологические модели, основанные на закономерных связях между геолого-минералогическими особенностями объектов и показателями переработки руд. Обоснованы геолого-минералогические критерии управления качеством сырья с целью формирования шихты или технологических типов с заданными свойствами и процессами обогащения с использованием экспрессного определения показателей качества руд. Систематизированы существующие и предложены новые термины в области ТМ и оценки. В книге приведен огромный фактический материал для использования в научной, практической и педагогической деятельности.

Оценивая в целом роль комиссии ТМ при РМО на Y этапе, следует отметить, что ей удалось объединить усилия ученых и производственников вокруг наиболее значимых теоретических и практических проблем ТМ, способствуя решению конкретных задач по комплексному изучению, оценке ПИ при ГРР и переработке с получением различной продукции для народного хозяйства страны.

### Этап VI. Развитие современных направлений ТМ в прогнозной оценке труднообогатимого МС и получения новых материалов (Комиссия ТМ РМО, 2004- н.в.)

Комиссию ТМ с новым составом бюро возглавил В.В. Щипцов.

**ВЛАДИМИР ВЛАДИМИРОВИЧ ЩИПЦОВ –** Директор Института Геологии КарНЦ РАН, руководитель лаборатории «геологии, технологии и экономики минерального сырья» и зав. кафедрой «геологии и геофизики» ГГФ Петрозаводского ГУ. Заслуженный деятель науки РФ и РК, профессор, доктор геол.-мин. наук, организатор науки, создатель и руководитель научной школы по ТМ индустриальных минералов. За плодотворную научную, научно-организационную и общественную деятельность награжден Почетными грамотами РАН, Минэкономразвития и природных ресурсов РК; золотой медалью к юбилею И.Н. Плаксина; Почетной медалью № 3 и дипломом Российской Ассоциации «Промышленные минералы» и др.

Комиссии на этом этапе продолжила работы по совершенствованию системы принципов и методов ТМ различных направлений при активной деятельности научных школ по ТМ. Это нашло отражение в тематике 7-ми научных семинаров, проведенных в различных городах страны в период 2006–2012 гг. Как правило, на заключительном этапе семинара проводился круглый стол с обменом мнений по наиболее актуальным проблемам ТМ. В приводимой ниже таблице показано содержание изданных сборников по важнейшим проблемам фундаментальных и прикладных исследований. Однако, сегодня следует особо подчеркнуть, что на современном этапе развития минерально-сырьевых комплексов России значительная часть разведанных и перспективных для использования объектов отличается низким качеством руд и неблагоприятными для освоения геолого-экономическими условиями.

Промышленное освоение МПИ сопровождается значительными потерями главных и сопутствующих компонентов, большими объемами вскрышных работ и, как следствие, негативным влиянием на окружающую среду. «*Традиционные технологии обогащения нередко либо не в состоянии обеспечить рентабельность освоения месторождений, либо не отвечают жестким требованиям экологической безопасности*» [45].

Дальнейшее развитие минерально-сырьевой базы может быть обеспечено за счет создания и применения новых, эффективных безотходных и малоотходных технологийдобычи и переработки руд с замкнутым технологическим циклом при комплексном извлечении полезных минералов, утилизации отходов и рекультивации земель. Это обусловливает новые требования к изучению вещественного состава при технологической оценке природного и техногенного МС – более мелко- и тонкозернистого, поликомпонентного, порой нетрадиционного. И здесь на помощь ТМ приходят новые минералогические идеи и методы исследования вещества. Так, определяя тенденции развития минералогии на современном этапе, ***Н.П. Юшкин*** [46] ***подчеркивает значение интервенции минералогического познания во все области естествознания, в микромир, развитие таких направлений,*** **как микро- и наноминералогия.** Минералогия активно входит в понятия пограничья минерального мира – структурно-конституционные и пространственно-временные. ***В технологических схемах все большую роль начинает играть*** **размерный фактор** ***сосуществующих минералов.*** **Наноразмерные технологии** ***предполагают изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонент на молекулярном, атомарном, электронном уровнях, когда появляется возможность управлять процессами на уровне формирования ПИ*** [47] (Котова, 2004; Конеев, 2006; Чантурия, 2003–2004 и др.). Это позволило по-новому подойти к минералого-технологической оценке комплексности, экологичности ПИ и отходов, разработке нестандартных методов их оценки, технологии добычи и обогащения; обеспечить разработку экономо-экологических технологий получения новых нетрадиционных видов сырья (цеолиты, сапонит, полевые шпаты, кианит, гранаты и др.), постоянно расширяя области их применения. Поэтому на **6 этапе** получили дальнейшее развитие раннее выдвинутые направления ТМ в научных школах ВИМСа (Ожогина Е.Г.), петрозаводской (Щипцов В.В.), казанской (Лыгина Т.З.), сыктывкарской (Юшкин Н.П., Остащенко Б.А., Котова О.Б.), новосибирской (Юсупов Т.С.) и др. Особое внимание стало уделяться минералогическим исследованиям и обогатимости нерудных и нетрадиционных видов МС. Это обусловило внедрение в минералого-технологические исследования достижений наноминералогии и нанотехнологий при оценке многих видов МС (шунгит, цеолиты, глины, шлаки, лежалые хвосты ОФ и др.). Это стало возможным в связи с обеспечением системы разработки малоотходных и безотходных технологий при комплексности МС и решением проблем экологии в широком понимании. Сегодня особенно резко обострились проблемы экологии окружающей среды из-за неэффективной во многих случаях переработки МС.

Таблица 1. Тематика и содержание семинаров по актуальным проблемам технологической минералогии

| |
|---|
| **1-й семинар Петрозаводск, 2006 г** |
| ***Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов на ранних стадиях ГГР*:** методологические аспекты ТМ; изучение типоморфных особенностей минералов на ранних стадиях ГРР, значение использования природно-размерного эффекта промышленных минералов для создания принципиально новых материалов, роль ТМ в решении проблем рационального природопользования, комплексного применения природных ресурсов и промышленных отходов, роль аналитических методов в решении вопросов технологической минералогии. |
| **2-й семинар Петрозаводск, 2007 г.** |
| ***Значения исследований ТМ в решении задач комплексного освоения минерального сырья:*** фундаментальные и прикладные исследования при решении проблем ТМ в процессе изучения ПИ, как основы оценки их комплексности; роль ТМ в решении задач комплексного использования различных видов МС в разных районах РФ; возможности современных методов при оценке минерального сырья***;*** проблемы комплексной переработки природного МС; исследование структурных изменений минералов в процессах технологической переработки. |
| **3-й семинар, Петрозаводск, 2008 г.** |
| ***Новые методы ТМ при оценке руд металлов и промышленных минералов:*** значение методов экспресс-анализа при оценке рудных проявлений и месторождений; направленное изменение технологических свойств минералов, горных пород и руд; роль разработок в области нано-ТМ при создании эффективных комплексных нанотехнологий. |
| **4-й семинар, Казань, 2009 г.** |
| ***Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы:*** современные методы исследования руд металлов и промышленных минералов при оценке их технологичности; новые методы переработки минерального сырья и получение новых материалов; исследования в области наноминералогии; новые подходы к оценке минерального сырья с учетом его комплексного использования. |
| **5-й семинар, Сыктывкар, 2010 г.** |
| ***Минералого-технологическая оценка МПИ и проблемы раскрытия минералов:*** (новые подходы и методы при оценке МС с учетом его комплексного использования; новые методы переработки МС в свете проблем раскрытия минералов и руд; фундаментальные и прикладные исследования в области наноминералогии и нанотехнологии). |
| **6-й семинар, Петрозаводск, 2011 г.** |
| ***Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологической минералогии:*** особенности минералов и руд, определяющие их технологические свойства; основные методы изучения вещества и ТМ; влияние геолого-минералогических особенностей руд разных генетических типов на показатели их переработки; роль и влияние ТМ на выбор инновационных решений по комплексной переработке МС. |
| **7-й семинар, Москва, 2012 г.** |
| ***Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии:*** история становления и развития ТМ; роль и место ТМ в высоких технологиях XXI в.; прогнозная оценка качества МС методами прикладной минералогии; оценка технологических свойств отходов обогатительного и металлургического передела в перспективе их комплексного освоения; метрологическое обеспечение минералогических работ при технологической оценке ПИ; влияние минералого-технологических особенностей на выбор инновационных решений в технологии. |

Научной школой ВИМСа были продолжены системные исследования по вопросам формирования современных требований к изучению вещественного состава при технологической оценки природного и техногенного МС [45]. Как известно, показатели переработки ПИ определяются минеральным составом, текстурно-структурными характеристиками, контрастностью свойств и раскрываемостью минеральных агрегатов сосуществующих рудных и нерудных минералов на различных стадиях дробления и измельчения, эффективностью использования разделительных признаков на стадиях обогащения и физико-химическими свойствами, влияющими на выбор оптимальных способов и реагентных режимов при химико-металлургическом переделе. При этом важно иметь в виду, что информация о конституции минералов, составе и свойствах руд, пород и продуктов их обогащения является базой для принятия стратегических и оперативных решений на различных стадиях геологического изучения с учетом экономических позиций (капиталовложения на производство ГРР, проектирование и строительство горно-добычных и обогатительных предприятий). Такая *информация должна отвечать достаточно жестким требованиям с учетом: полноты и комплексности; точности и достоверности; объективности и сопоставимости; систематизации и сохранности получаемой информации – необходимой достаточности объемов и видов исследований, соотнесенных с конечными целями; экономической целесообразности.* Это тем более важно сегодня, когда к выполнению ГРР, минералого-аналитических, технологических исследований и отработке месторождений привлекаются организации различных форм собственности. Как показал многолетний опыт работ ВИМСа и ЦНИИГеолнеруда, важнейшим методологическим фактором оценки природных и техногенных объектов является рациональное комплексирование методов минералого-аналитичесих исследований. Сегодня этот комплекс включает в себя, кроме определения химического и изотопного состава сырья, высокоразрешающую оптическую и электронную микроскопию, рентгенографию, вычислительную рентгенотомографию, магнитометрию, ЯГР-спектроскопию, оптическую, инфракрасную и люминесцентную микроскопию, электронный парамагнитный резонанс, рентгенорадиометрический, фотометрический, рентгенолюминисцентный, термический методы анализа, а так же методы энергетического воздействия на МС. Постоянно в центре внимания использования комплекса методов находятся вопросы управления качеством минералого-аналитических исследований (аккредитация лабораторий; стандарты, регламентирующие порядок разработки и аттестация методик количественного анализа и контроль качества измерений на всех этапах работ; использование стандартных образцов, аттестование методик массового анализа минералов руд и горных пород; средства метрологического обеспечения). Все эти проблемы постоянно находятся в центре внимания различных совещаний, семинаров, публикаций по ТМ.

Как уже неоднократно подчеркивалось, в используемом МС резко возросла роль труднообогатимых руд, нетрадиционных видов сырья, требующих изучения их вещественного состава, с учетом наноразмерных выделений полезных и вредных компонентов. Так, *петрозаводской научной школой ТМ* сегодня широко рассматриваются вопросы теории и практики обогащения МС Карелии. Здесь обобщен опыт геолого-технологических исследований основных типов индустриальных минералов (ИндМ) региона – полевых шпатов, кварца, кианита, графита, граната, ильменита [48,49].

Определены геолого-минералогические основы их технологической оценки с позиций современных представлений теории обогащения; оценена степень технологического изучения труднообогатимых руд сложного вещественного состава и сформулированы основные направления технологий их обогащения. На большом фактическом материале по различным минералам и рудам удалось показать перспективы развития нового научного направления теории обогащения руд – *энергетического воздействия на их минералы и минеральные ассоциации* с целью интенсификации процессов разделения (под воздействием низкотемпературной плазмы и ультразвука). С позиций ТМ рассмотрены газово-жидкие включения (ГЖВ) в минералах и доказана возможность их удаления из различных минералов путем термообработки, СВЧ-излучения, воздействия мощными электромагнитными импульсами и радиационным излучением. Данными прикладных исследований технологии обогащения руд на стадии их геолого-промышленной оценки подчеркивается важность учета

многих альтернативных методов извлечения ПИ с учетом их комбинирования. В целом, в качестве перспективных направлений интенсификации процессов обогащения бедных и труднообогатимых руд рассматривается обеспеченность использования методов изменчивости свойств минералов путем механических, физических, химических и других видов воздействия. Приоритетными направлениями исследований здесь выступают – разработка научных основ, эффективных, экологически безопасных технологий обогащения МС Карелии, а также совершенствование более ранних технологических схем извлечения минералов из руд. Все затронутые вопросы широко обсуждались на семинарах комиссии ТМ, Плаксинских чтениях и других; опубликованы в статьях сборников комиссии и монографиях ИГКарНЦ.

Разработка методических основ и нормативно-методического обеспечения рационального комплекса методов изучения состава и свойств неметаллических ПИ (НПИ) на всех стадиях ГРР от прогнозно-поисковых до оценки технологических свойств успешно исследуются *казанской научной школой ТМ* при ЦНИИГеолнеруде. Институт обладает значительным опытом практического применения методов ТМ изучения НПИ (фосфориты, глинистое, карбонатное, цеолит – и углеродсодержащие, кремнистые породы и др.), являющихся сложными высокодисперсными, поликомпонентными системами. Так, Т.З. Лыгиной и под ее руководством разработаны методические основы комплексной оценки состава и свойств НПИ с учетом таких элементов как системность, оптимизация, унификация и стандартизация аналитико-минералогических методов исследования [50]. В практике работ по ТМ для различных видов промышленных месторождений НПИ реализован комплекс методов, включающий пакеты нормативных документов и стандартных образцов. Это позволило достичь единства измерений, повышения надежности и достоверности результатов, поверки оборудования, метрологической аттестации методик измерений, аккредитаций лабораторий. По основным видам НПИ рассмотрены возможности углубленного изучения вещественного состава и использования рационального комплекса аналитико-технологических методов исследования для обеспечения прогноза их обогатимости и создания эффективных схем переработки. При этом систематическое структурно-кристаллохимическое исследование минералов руд промышленных месторождений НПИ обеспечивает возможность целенаправленного использования получаемых результатов для оценки их качества и прогноза изменчивости технологических свойств. Значительное внимание в работах казанской школы ТМ уделяется в целом стратегии комплексной переработки НПИ за счет управления качеством передела руд и развития инновационных проектов. В частности, Т.З. Лыгиной предложена стратегия нового концептуального подхода к минералого-технологическому изучению НПИ (2010), обеспечиваемому: 1) высоким уровнем технологической оценки руд на разных стадиях ГРР; 2) управлением качества передела руд – формированием технологических типов сырья с заданными свойствами и усовершенствованием процессов обогащения с помощью распознавания минеральных ассоциаций – природных типов по экспрессно определяемым параметрам; 3) направленным изменением ТСМ, горных пород и руд путем разработки рациональных схем извлечения НПИ, модификации и облагораживания. С помощью предложенной системы улучшаются физико-химические характеристики сырья при различных способах переработки: *механоактивация и модификация в энергонапряженном режиме, электрохимическая активация* (применение активированной воды и электрокинетического обезвоживания), *пульсационное, лазерное обогащение, крипто-термическое воздействие* и др. При этом происходят существенные изменения в структуре всех минеральных фаз породы (перестройка структуры, дефекты, изменение цвета и т.д.), что существенно отражается на их полезных свойствах, обусловливая расширение сфер использования МС. *Несомненно, новая методология комплексной оценки НПИ, в том числе и техногенных, обеспечивает рациональное комплексирование минералогических исследований и перспективных технологий их переработки, повышают качество ГРР, полнее используя богатства недр, и увеличивают их инновационную привлекательность*.

В развитии исследований тонкодисперсного МС особо значимы стали работы *сыктывкарской минералогической школы, в том числе, и по ТМ*. С вовлечением в обогащение

тонкодисперсных видов МС изменяется привычное представление о ПИ. Весьма значимыми при этом становятся исследования **техногенной онтогении ОМЧ минералов**, позволяющие проследить эволюцию формирования их технологических свойств. ***Разработка, обоснование способов и методов направленного изменении природных свойств минералов с учетом размерного фактора позволяет изменять не только обогатимость различных видов ПИ и отходов, но создавать новые процессы извлечения компонентов, получать новые материалы.*** Микромир стал основным источником открытий новых минералов, особенно сульфидов, простых веществ и т.п. При изучении природы и оценке тонкодисперсного МС новые возможности перед ТМ. Именно этим вопросам много внимания уделяется сыктывкарской школой ТМ. Здесь созданы новые технологии извлечения тонкого Au на основе нанотехнологий [51]. В отличие от традиционного технологического подхода Б.А. Остащенко [51] показана возможность создания поверхностного заряда у минералов, сопутствующих Au в концентрате, при термоэлектрической сепарации. Выяснилось, что равновесие на поверхности минерала, обусловленное адсорбцией $OH^-$, $H^+$ ,$O^-$. $CO^-$, $C^-$, можно сдвинуть в ту или иную сторону самыми различными способами, в том числе нагреванием, облучением и др. Масспектроскопические и манометрические исследования выявили, что поверхность минералов шлиха (концентрата) в обычных условиях покрыта ионами $OH^-$. При нагревании они уходят с поверхности силикатов при 220$^o$C и оксидов при 400$^o$C [51].Так как ОН-группы имеют отрицательный заряд, то с их удалением поверхность частицы заряжается положительно. При этом на поверхности образуется нескомпенсированный заряд $Q_s$. У золота и алмаза при этой температуре величина заряда близка к нулю. Извлечение 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 (сообразованием 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. Особенности минерального состава руд позволяют выбирать наиболее оптимальную методику для определения в них истинного содержания благородных металлов на этой основе разрабатывать рациональную технологию обогащения. Сегодня становятся составной частью комплексной переработки природного и техногенного МС методы получения наноминералов (плазменный, осаждение из газовой фазы, включая диссоциативную фотосорбцию; синтез из гелевых растворов; электроосаждение; ударное и электроимпульсное измельчение; природное образование). Здесь особую роль играет энергетика. Огромные возможности энергии поверхностных процессов просматриваются в адсорбофизических методах сепарации, базирующихся на исследованиях кристаллохимических и кристаллофизических процессов в гетерогенных системах под влиянием различных воздействий [52].

Целый ряд проблем ТМ и, прежде всего, с позиций технолога рассматриваются *новосибирской школой* Института геологии и минералогии им. Соболева СО РАН под руководством Т.С.Юсупова. В значительной степени они связаны с физико-химическими изменениями при диспергировании минералов в области теории и практики обогатительных процессов различных видов ПИ (2010–2012). При этом много внимания уделяется процессам механоактивации, позволившим обосновать новые технологические решения переработки и использования МС на основе изменения структуры и свойств минералов. Показаны возможности управления реакционной способностью ряда упорных минералов: в частности, апатита путем введения в процесс механоактивации катионообменников, представленных клиноптилолитом; исследована обратная задача – снижение водорастворимой способности монофосфата Ca (суперфосфата) путем его твердофазного взаимодействия с цеолитом при механических воздействиях. Это послужило основой создания нового фосфор-цеолитного удобрения пролонгированного действия. Ранее в 80-е годы XX столетия были изучены физио-химические изменения слоистых силикатов в процессах

механоактивации. Установлено также влияние термообработки на структурно-химические и флотационные свойства касситерита, позволившие обосновать технологическую схему обогащения сульфидно-касситеритовых техногенных образований; обоснованы актуальность и перспективность тонкого деинтеграторного измельчения перед флотационным обогащением на примере углей высоких стадий метаморфизма и другие разработки. В конечном итоге, Т.С. Юсупов *«За большие заслуги* ***в области технологической минералогии и комплексной переработки минерального сырья****, плодотворную научную, педагогическую деятельность и в связи с 75-летием со дня рождения»* был отмечен Почетной грамотой СО РАН.

Интересные исследования по использованию математических подходов в оценке ТСМ и выявлению закономерностей поведения минералов при обогащении ПИ рассматриваются в работах члена бюро комиссии по ТМ Ю.Л.Войтеховского, что нашло отражение, в частности, в его докладе «О методологии и методах технологической минералогии: дискуссия» на VII-ом семинаре (Москва. ВИМС, 2012). Совершенно очевидно, что это сегодня актуальная проблема. Весьма перспективны разработки по комплексному использованию кианита Больших Кейв как нетрадиционного сырья на Al.

Несомненно, весьма важным моментом в развитии ТМ явилось создание с 2000 г при отделении РАН по проблемам обогащения руд самостоятельного направления по ТМ, что позволило более четко объединить усилия минералогов, геологов и технологов в связи с конкретными технологическими решениями по использованию различных видов МС. Технологами [53,54] предложены разнообразные направленные изменения физико-химических свойств минералов в процессах обогащения ПИ, *методы вибромеханической активации руд перед обогащением*, обеспечивающие селективность раскрытия руд преимущественно по границам срастаний минералов или отдельных кристаллических блоков (в частности, 20 мкм); *гидрофобный метод выделения минералов (на стыке флотации и полиградиентной магнитной сепарации),* позволяющий эффективно извлекать в магнитную фракцию магнитные и слабомагнитные минералы; *использование мощных электромагнитных импульсных воздействий* (МЭМИ) при переработке упорных золотосодержщих сульфидных руд и продуктов обогащения. При различных видах энергетического воздействия возможно направленно преобразовать ТСМ, выбрать оптимальный способ модификации, изменив целенаправленно контрастность сепарируемых минералов и оптимизировав схему обогащения. В настоящее время эффективно используются многие приемы ТМ при изучении вещественного состава руд и различных нетрадиционных видов МС в связи с разработкой нанотехнологий по извлечению полезных компонентов (Au, Pt, сульфиды, минералы глин, цеолитов и др.). «Понимая, что наноминералогия, как и многие другие нанонауки, находится только в начале пути, тем не менее следует подчеркнуть, что она уже сейчас оказывает влияние на традиционные, фундаментальные представления о кристаллизации, минералообразовании и формировании рудных концентраций» [41]. **Преобразование качеств минералов такого сырья реализуется в ряду:** ***минералогия →технологическая минералогия → технология → материаловедение.*** И хотя многие нанотехнологические решения носят сегодня лабораторный характер, исследуются в тонких экспериментах – за ними будущее нашей науки и практики.

В заключение исторического обзора по проблеме следует подчеркнуть, что ТМ является одним из ведущих направлений ПрМ, в становление и развитие которой внесли вклад ученые и производственники – минералоги, геологи, технологи, горняки и специалисты многих смежных профессий.

Говоря о будущем ТМ, следует подчеркнуть ее ***системный инновационный подход*** к минералого-технологической оценке различных видов МС, как природного, так и техногенного, с учетом:

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

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

– определения минералогических критериев оценки ПИ в единой геолого-техногенной системе на основе комплекса физико-химических методов и прослеживания закономерностей эволюции ТСМ в различных узлах технологической схемы;

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

– внедрения комплексных технологий получения новых нетрадиционных видов МС;

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

Существенный вклад в развитие различных направлений ПрМ (в том числе в ТМ) внесли: В.М.Севергин, В.И. Вернадский, Н.М. Федоровский, А.И. Гинзбург, А.Г. Бетехтин, Е.К.Лазаренко, Н.П. Ющкин, В.И. Ревнивцев, И.Н. Плаксин, В.А. Чантурия, И.Т. Александрова, Л.А. Барский, В.З. Блисковский, В.П. Борискин, В.А, Ю.Л. Войтеховский, Глазковский, Л.В. Грекулова, Д.П. Григорьев Г.И., Л.А. Данилевская, Дементьева (Доливо-Добровольская), В.В. Доливо-Добровольский, О.Б. Дудкин, В.Д. Евтехов, В.В. Зуев, О.П. Иванов, В.М. Изоитко, В.И.Кевлич, А.П. Козлов, Р.И.Конеев, О.В. Кононов, О.Б. Котова, Г.А. Коц, В.И. Кузьмин, Ю.С. Кушпаренко, Е.Н. Левченко, Т.З. Лыгина, В.В. Матиас, О.И. Матковский, Г.Б. Мелентьев, Д.А. Минеев, Б.А. Остащенко, Г.В. Остроумов, Е.Г. Ожогина, В.И. Павлишин, Б.И. Пирогов, В.А.Попов, А.А. Рогожин, А.Х. Туресебеков, Г.А. Сидоренко, С.Ф., Л.С. Скамницкая, А.Н, Хатькова, И.В. Холошин, Чернопятов, А.В. Чистов, В.В. Щипцов, И.В. Шманенков, Т.Н. Шурига, В.Ю. Эшкин, Л.К. Яхонтова и многие др. Среди зарубежных ученых следует назвать П. Рамдора, Б.А., Уилса, Г.М. Швартца, Ю.Н. Кэмерона, М.П. Джонса и др. *В практике ГРР и ГОКов широко использовались достижения научных школ ТМ: московской – ВИМСа (Федоровский Н.М., Гинзбург А.И., Сидоренко Г.А., Ожогина Е.Г.), ленинградской (Ревнивцев В.И., Изоитко В.М.), украинской (Пирогов Б.И.), карельской (Щипцов В.В.), казанской (Лыгина Т.З.), сыктывкарской (Юшкин Н.П., Остащенко Б.А., Котова О.Б.), новосибирской (Юсупов Т.С.) узбекской (Конеев Р.И., Туресебеков А.Х.) и др.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Юшкин Н.П. История минералогии и эволюция фундаментальных минералогических идей. Серия препринтов «Научные доклады». Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1984, вып. 102, с. 52.
2. Ревнивцев В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых. // ЗВМО, 1982, вып. 4. С. 4–20.
3. Ушакова Н.Н., Фигуровский Н.А. Василий Михайлович Севергин (1765–1826). М.: Наука, 1981 (Научные биографии), 160 с.
4. Федоровский Н.М. Наши достижения в области прикладной минералогии. М.–Л.: Главная ред. геологоразведочной и геодезической литературы. 1935, 160 с.
5. Парамонов И.В., Коробочкин Н.П. Николай Михайлович Федоровский (1886–1956). М.: Наука,1979,180 с.
6. Доливо-Добровольский В.В., Глазковский В.А. Изучение вещественного состава руд в целях обогащения: (Основные задачи и методы). Свердловск-Москва: Металлургиздат, 1946, 46 с.
7. Глазковский В.А. Геолого-минералогические основы технологической оценки руд месторождений железа. М.: Госгеолтехиздат, 1954, 182 с.
8. Плаксин И.Н. О некоторых задачах развития науки обогащения полезных ископаемых в области флотации // Металлургиздат, Цветные металлы, 1952, № 6. С. 17–25
9. Пирогов Б.И. Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. М.: Недра, 1969, 240 с.
10. Глембоцкий В.А., Дмитриева Г.М. Влияние генезиса минералов на их флотационные свойства. М.: Наука, 1965, 110 с.
11. Пирогов Б.И. (отв. ред.). Изучение вещественного состава и технологических свойств руд. М.: Недра. Сб. трудов ин-та Механобрчермет, № 10, 1969, 271 с.

12. Григорьев В.М. (отв. ред.). Изучение вещественного состава и обогатимости железных руд. М.: Недра (МинГео СССР, ВИМС), 1976, 139 с.
13. Ли А.Ф. Минералогическое исследование руд цветных и редких металлов. М.: Недра, 260 с.
14. Гинзбург А.И., Александрова И.Т. Технологическая минералогия – новое направление минералогических исследований. М.: Разведка и охрана недр, 1974, № 3. С. 36–40.
15. Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 1981, 240 с.
16. Григорьев Д.П., Жабин А.Г. Онтогения минералов. М., 1975, 340 с.
17. Блисковский В.З. Обогатительная минералогия руд – самостоятельный раздел минералогической науки. В сб. Вещественный состав фосфоритных руд. М.: Тр. ГИГХС, 1975, вып. 30. С.3–29.
18. Белянкин Д.С., Иванов Б.В., Лапин В.В. Петрография технического камня. М.: АН СССР, 1952, 582 с.
19. Рамдор П. Рудные минералы и их срастания. М.: И.Л., 1962, 1132 с.
20. Кэмерон Ю.Н. Рудная микроскопия (современные методы исследования рудных минералов под микроскопом). М.: Мир, 1966, 308 с.
21. Крэйг Дж., Воган Д. Рудная микроскопия и рудная петрография. М.: Мир, 1983, 423 с.
22. Джонс М.П. Прикладная минералогия. Количественный подход. М.: Недра, 1991, 391 с.
23. Ревнивцев В.И. (Отв. ред.). Технологическая минералогия главнейших промышленных типов месторождений. Л.: ЛО-Наука, 1987, 200 с.
24. Григорьев Д.П. Позиции онтогении минералов // ЗВМО. 1978. Ч. 107.Вып.4. С. 407–415
25. Пирогов Б.И. Онтогенический метод в познании технологических свойств минералов. Сб. Проблемы онтогении мирералов. Л.: Наука, . С. 22–30
26. Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. Технологическая минералогия железных руд. Л.: Наука, 1988, 304 с.
27. Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья. М.: МинГео СССР, ВИМС. Сб. науч. тр. 1987, 146 с.
28. Роль технологической минералогии в расширении сырьевой базы СССР. Тезисы докладов на Всес. Конф. Челябинск: 1986, 185 с
29. Ревнивцев В.И. (Отв. ред.). Проблемы направленного изменения технологических и технических свойств минералов. Л.: Механобр, 1985, 136 с.
30. Григорьев Д.П., Юшкин Н.П. (Отв. ред.). Теория минералогии. Ленинград: Наука. 1988, 141 с.
31. Минералогическое картирование рудных полей и месторождений. Тезисы докладов III Всесоюз. минер. семинара. Свердловск-Миасс: УНЦ АН СССР, 1983, 170 с.
32. Пирогов Б.И., Тарасенко В.Н., Холошин И.В. Принципы и методы геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых. Учеб. пособие. Киев: УМК ВО Минвуза УССР, 1989, 64 с.
33. Иванов О.П. Топоминералогический анализ рудных месторождений. Л.: Наука, 1991, 209 с.
34. Мельник Ю.П. (Отв.ред.) Онтогения минералов и технологическая минералогия: Сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т геохимии и физики минералов. Киев: Наукова думка, 1988, 228 с.
35. Geologic-technological assessment of ore minerals, samples and deposits: Interdepart. coll. of research proceed. Leningrad: Mekhanobr, 1990, 152 p.
36. Остапенко П.Е. (отв. ред.). Технологическая оценка минерального сырья (Опробования месторождений. Характеристика сырья): Справочник // М.: Недра. 1990, 272 с.
37. Борискин В.П., Сидоренко Г.А. Достижения и направления развития технологической минералогии в ВИМСе. Мин. сырье (вопросы фундаментальной и прикладной минералогии) №1. М.: ВИМС. 1997. С.. 181–190.
38. Дементьева (Доливо-Добровольская Г.И.) Г.И. Структурно-размерный анализ диспергированных минералов. //Автореф. дис. Санкт-Петербург, 1994, 29 с.
39. Ревнивцев В.И, Доливо-Добровольская Г.И., Владимиров П.С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1993, 248 с.

40. Геолого-технологическая оценка и переработка руд месторождений разных генетических типов. Тезисы докладов междун. симп. «минерально-сырьевые ресурсы России». СПб.: Механобр, 1993, 68 с.
41. Конеев Р.И., Кушмурадов, Туресебеков А.Х. Микроминералогия – Предмет, Методы, Применение. Ташкент: Университет, 1994, 90 с.
42. Туресебеков А.Х. Конеев 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, . С.174–175.
43. Конеев Р.И. Наноминералогия золота. СПб.: DELTA, 2006, 220 с
44. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. СБ.: Наука, 1997. 582 с.
45. Рогожин А.А., Ожогина Е.Г., Кордюков С.В. (ФГУП ВИМС), Лыгина Т.З. ( ФГУП ЦНИИгеолнеруд)// Обогащение руд, 2006, № 3. С. 34–37.
46. Юшкин Н.П. Современная минералогия и новые тенденции ее развития // Новые идеи и концепции в минералогии. Сыктывкар, 2002. С.8–9.
47. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества // СПб.: Наука, 2005, 581 с.
48. Щипцов В.В. Технологическая минералогия индустриальных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерагения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 119–123.
49. Щипцов В.В., Каменева Е.Е, Скамницкая Л.С.Теория и практика обогащения минерального сырья Карелии. / Петрозаводск: .КарНЦ РАН. Сб. науч. тр.КарНЦ РАН. В. 9. С.183–196, 2006.
50. Лыгина Т.З. Методические основы комплексной оценки состава и свойств неметаллических полезных ископаемых //Автореф. дис. М.:РИЦ ВИМС. 2001, 50 с.
51. Остащенко Б.А. Направленное изменение технологических свойств минералов. //Автореф. дис. Сыктывкар: ИГ КомиНЦ УрО РАН, 1998, 43 с .
52. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004, 194 с.
53. Направленное изменение физико-химических свойств минералов в процессах обогащения полезных ископаемых (отв. ред. Чантурия В.А.) // Плаксинские чтения. М.: Альтекс, 2003, 145 с.
54. Современные методы оценки технологических свойств труднообогатимого и нетрадиционного минерального сырья благородных металлов и алмазов и прогрессивные технологии их переработки (отв.ред.Чантурия В.А.) // Плаксинские чтения (Иркутск). М.: Альтекс, 2004. 232 с.

## РОЛЬ И МЕСТО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ В ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ XXI ВЕКА

***Щипцов В.В.***

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

«Не существует минералов, не имеющих практического значения. Мы просто не умеем еще все их использовать» (А.И.Гинзбург, 1954)

Развитие ранней мировой цивилизации связано с использованием семи металлов – золота (с 6 тысячелетия до н.э.), меди (с 4.2 тысячелетия до н.э.), серебра (с 4 тысячелетия до н.э.), свинца (с 3.5 тысячелетия до н.э.), железа (с 1.5 тысячелетия до н.э.) и ртути (с 750 лет до н.э.).

Например, если возьмем территорию в геологическом масштабе такую, как Фенноскандинавский щит, то наиболее ранние сведения об использовании болотных железных руд

в Фенноскандии относятся к периоду более чем 2000 лет назад (территория сегодняшней Норвегии и Швеции), следы подземной добычи руд датируются возрастом 11–12 столетие н.э., добыча в XVI-XVII веках активизируется в Норвегии и Швеции. Помимо меди, железа, серебра, стали добывать цинк, никель, кобальт. Так, например, на руднике Lokken (современная территория Норвегии) в 1654–1987 гг. добывали Cu, Zn (запасы 24 млн т руды) и добыто 552 тыс. т меди и 432 тыс. т цинка. В период с примерно 800 до 1992 гг. на руднике Falun (современная территория Швеции) добывали Cu, Zn, Au и добыто за 3432 тыс. т меди, 456 тыс. т цинка и 34 т золота [1]. Подземные горные разработки начали осуществляться в 17 веке в Финляндии и в 18 веке на Северо-Западе современной России.

Многие металлы были открыты в последние два столетия. Это было связано с глобальным устойчивым развитием горной промышленности и технологий обогащения. Минерально-сырьевая база настоящей России сформирована более, чем за 90-летнюю историю. Открытие месторождений, вовлечение металлов и промышленных минералов влияло на развитие новых технологий, содействовало прогрессу на определенном этапе. В современной период вклад минерально-сырьевого комплекса в экономику России составляет более 35 % валового внутреннего продукта (ВВП). В основу концепции развития минерально-сырьевой базы России заложена сбалансированная минерально-сырьевая политика, отвечающая принципам национальной безопасности и приоритетным интересам государства [2–4].

## Новая сырьевая глобальная стратегия XXI века

Долгое время редкоземельные металлы (РЗМ) считались весьма редкими и малоперспективными для использования. Они применялись в качестве калильных сеток (оксид церия и тория) в газовых лампах (патент 1884 года), в сплаве с железом, в качестве «кремешков» для зажигалок и наполнителей трассирующих пуль. В середине 30-х г. XX в. производство их значительно расширилось после выявления легирующих действий РЗЭ на сталь, чугун и сплавы цветных металлов.

Вообще среднее содержание в земной коре РЗМ (в сумме) составляет $112\times10^{-4}$ %. Наиболее распространен в земной коре церий, наименее — тулий и лютеций [5]. Главнейшие минералы редких земель — монацит (Ce, La)$PO_4$, ксенотим $YPO_4$, бастнезит $Ce[CO_3](OH, F)$, паризит $Ca(Ce,La)_2[CO_3]_3F_2$, гадолинит $Y_2FeBe_2Si_2O_{10}$, ортит $(Ca, Ce)_2(Al, Fe)_3Si_3O_{12}(O,OH)$, лопарит $(Na,Ca,Ce)(Ti,Nb)O_3$, эшинит (Ce, Ca, Th)(Ti, Nb)$2O_6$. Основным промышленным сырьем на РЗМ цериевой группы являются бастнезитовые карбонатиты и их коры выветривания (основной источник) древние и современные монацитовые прибрежно-морские россыпи, а в России, лопаритовые уртиты.

Новая сырьевая глобальная стратегия XXI века предполагает повышение эффективности использования сырьевых материалов, создание высоких технологий. В настоящее время в развитых странах мира особое внимание уделяется вопросу **критических металлов и промышленных минералов.** На примере США в последние годы под эгидой Комитета по ресурсам Земли Национального совета исследований (Committee on Earth Resources (CER) of the National Research Council (NRC) определены критические металлы и промышленные минералы. В апреле 2010 года Government Accountability Office (GAO) опубликовал отчет "Rare Earth Metals in the Defense Supply Chain" [6] . Палата представителей США в сентябре 2010 года значительным большинством голосов приняла документ "Rare Earths and Critical Materials Revitalization Act", который должен облегчить освоение отечественных запасов и добычу редкоземельных элементов. В декабре 2010 года министерство энергетики США (Department of Energy, DOE) выпустило документ "Critical Materials Strategy" и, наконец, принят документ ***«The National Strategic and Critical Minerals Policy Act of 2011, on July 20, 2011».***

Комитет выделил целую группу металлов XXI века [7] – это медь, галлий, индий, литий, марганец, ниобий, платиновая группа металлов (платина, палладий, родий, иридий, осмий, рутений), РЗЭ (лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), а также тантал, титан и ванадий.

14 металлов характеризуются в нем как критически важные, а шесть из них – как крайне критически важные: это пять РЗЭ (диспрозий, неодим, тербий, европий и иттрий), а также индий.

Китай относится к важнейшему производителю РЗМ, например, по данным GAO USA (2010) в этой стране производились в мировом масштабе следующие доли: 97 % редкоземельных руд, 97 % редкоземельных окислов, 89% редкоземельных сплавов, 75 % NdFeB магнитов и 60% SmCo магнитов [6, 8]. С 1960 по 1980 гг. США был лидером мирового производства на основе РЗЭ. Процесс производства продукции из редкоземельного сырья сложный и дорогой. Стадии производства – это добыча, обогащение, очистка, сплавление, получение конечного продукта или компонента.

Добыча РЗМ по оценке Геологической службы США в 2009 г. составила 133 тыс. т редкоземельных оксидов (РЗО). РЗЭ чаще всего проявляют степень окисления +3. Из-за этого наиболее характерными являются оксиды $R_2O_3$ — твёрдые, крепкие и тугоплавкие соединения. Основными мировыми производителями являются Китай — 96,9 %; Индия — 2 %; Россия — менее 1 %; Бразилия — 0,4 %; Малайзия — 0,26%. На долю США, Казахстана, Кыргызстана, Нигерии, Индонезии, Шри-Ланка, Северной Кореи и Вьетнама в 2009 г. приходилось (по данным USGS) менее 0,4 % мировой добычи.

Основное редкоземельное производство в Китае сосредоточено в районе «Редкоземельной Долины» (Chinas Rare Earth Valley) близ г. Баотоу, занимающей площадь 50 кв. км. За счет производства РЗМ и значительных инвестиций Китая этот район планируется превратить в зону развития высокотехнологичной редкоземельной промышленности (Rare earth Hi-tech Industrial Development Zone).

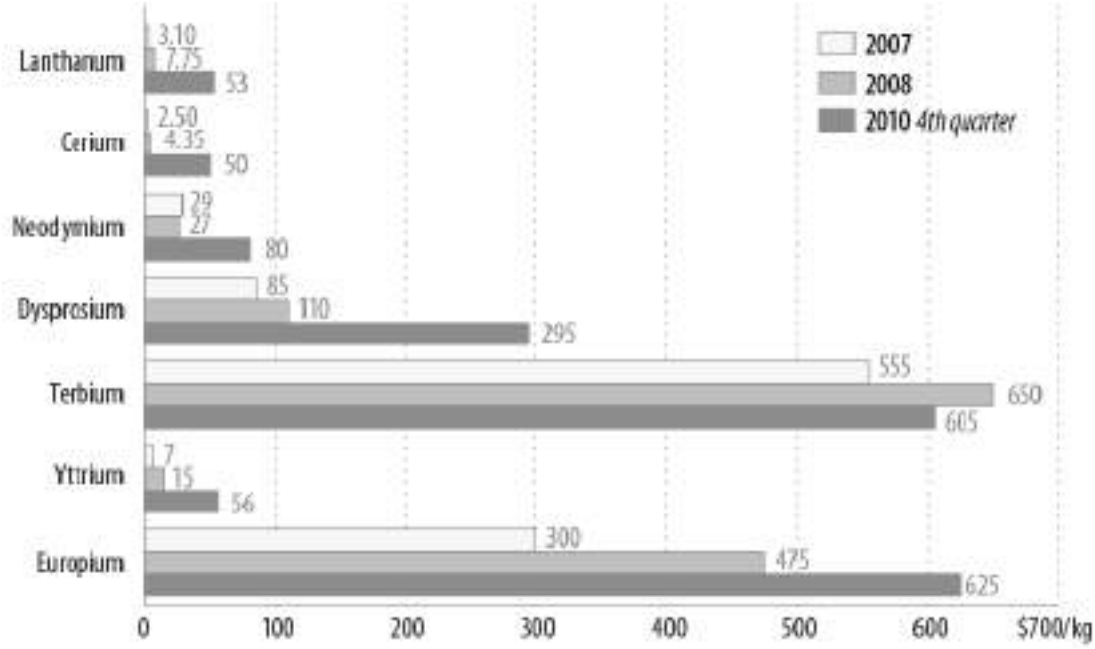



**Рис. 1. Цены на некоторые РЗЭ по годам, в $ за кг. Источник: IMCOA, 2011 and METI, 2011**

Ключевым моментом становится Программа по критическим металлам и минералам ЕС для устойчивого развития технологий и потенциального воспроизводства металлов и минералов для будущего. Группа известных экспертов и специалистов ЕС подготовила в 2010 г. важный документ по критическим видам минерального сырья под зонтиком Группы ЕС по запасам минерального сырья [9]. В европейский список включены следующие критические металлы и минералы: Al, Li, Sb, Mg, Mn, Mo, Mn, Ni, Nb, Cr, PGE, Co, REE, Cu, Re, Ag, Ga, Ta, Ge, Te, Ti, W, In, V, Fe, Zn,

магнезит, барит, боксит, бентонит, бораты, перлит, глины (каолин), диатомит, кварцевый песок, особо чистый кварц, полевой шпат, флюорит, тальк, графит, гипс, известняк. Такое внимание уделено полезным ископаемым в связи с большими геополитическими и экономическими изменениями и важной ролью в этом процессе минерального сырья.

Четыре сектора промышленности прямым образом связаны с критическими металлами и промышленными минералами:

1. автомобилестроение;
2. авиакосмическая промышленность;
3. электроника;
4. энергетика.

Таблица 1. Конечные продукты использования РЗЭ

| Легкие РЗЭ | Главный конечный продукт | Тяжелые РЗЭ | Главный конечный продукт |
|---|---|---|---|
| лантан | водородный двигатель, металлические сплавы | тербий | люминофоры, постоянные магниты |
| церий | автокатализаторы, очистители нефти, металлические сплавы | диспрозий | постоянные магниты, водородный двигатель |
| празеодим | магниты | эрбий | люминофоры |
| неодим | автокатализаторы, очистители нефти, жесткие диски, водородный двигатель | иттрий | флюоресцентные лампы, керамика, металлические сплавы |
| самарий | магниты | гольмий | стеклокрасители, лазеры |
| европий | телевизионные и компьютерные экраны | тулий | медицинские рентгеновские установки |
| | | лютеций | катализаторы для очистки нефтик |
| | | иттербий | лазеры, стальные сплавы |
| | | гадолиний | магниты |

Источник: IMCOA, 2011

Использования новых минералов и элементов в создании компьютерных чип-технологий резко меняется в сторону возрастания за последние десятилетия [10]. По данным компании *Intel Corporation* в 80-ые годы прошлого столетия в производстве нашли применение H, B, N, O, F, Al, Si, P, Cl, Ar, As, Sb, 90-ые годы — Ti, Br, Ta, W, а уже в последнее десятилетие необходимыми металлами и элементами в чип-технологиях нового поколения при создании новейших схем стала большая группа металлов и элементов, к которым относятся He, C, Ca, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ge, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, In, Ba, La, Gf, Re, Os, Ir, Pt, Au, Pb, Bi, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Hb, Eb, Tu, Yb, Lu. Все это позволяет создавать оптоэлектронные чипы, объединяющие на одном кристалле обычные полупроводники и оптические элементы — модуляторы, волноводы, мультиплексоры. Подобная технология вполне может масштабироваться до пета- и эксабитных скоростей. Другой пример касается геномики, когда применение ДНК-чипов предоставляет возможность количественно определить уровень экспрессии всех генов любого генома. Перспектива резкого расширения рынка чип-технологий приведет к появлению новой и очень перспективной сферы высокотехнологического бизнеса. Один из многих примеров экспериментальной практики касается сварки между индиевыми столбами связи и матричных мультиплексаров и матрицами фотоприемных устройств на основе пленок кадмий–ртуть–теллур для flip–chip технологии [11].

Еще несколько примеров конкретного использования некоторых критических металлов в высоких технологиях начала XXI века: силовые установки и каркасные конструкции самолетов (титан),

мобильные телефоны (тантал), жидкокристаллические дисплеи (индий), компьютерные микросхемы (многие редкие металлы), фотогальванические элементы (кремний, галлий, кадмий, селен, теллур, индий), аккумуляторные батареи (литий, редкие земли, никель) и другие примеры. Кроме того, в строительстве зданий и промышленных сооружений, железных дорог, автомобильных дорог, электростанций, сооружений трубопроводов и других объектов инфраструктуры существует огромная потребность в использовании строительно-конструкционных материалов и сырья для их производства (цементное, керамическое и стекольное сырье, естественные строительные материалы, сырье для получения легких заполнителей бетонов и сырье для каменного литья) [12].

Наряду с группой критических металлов, где значительное место занимают в технологиях XXI века РЗЭ, не теряют своей важной роли промышленные минералы, некоторые из которых, как приведено выше, попадают в список критических минералов. Ценность балансовых (разведанных) запасов промышленных минералов в России адекватна стоимости металлов и алмазов [3]. Мировая конъюнктура и динамика цен на основные промышленные минералы достаточно стабильны и имеют тенденции к росту.

В основу ценности промышленных минералов положены свойства, определяющие в свою очередь три группы [13]:

1. Первая группа определяется физическими свойствами. В производстве они не требуют химико-технологического передела. Основной фактор оценки ресурсов этих минералов основан на прогнозе благоприятных условий для роста кристаллов (особо чистый кварц, пьезооптическое сырье, асбест, слюда).
2. Вторая группа определяется физическими и химическими свойствами. Они используются в производстве без существенного химико-технологического передела (тальк, магнезит, полевые шпаты, кианит, анадалузит, силлиманит, гранат, ставролит, оливин, волластонит, барит, графит, цеолиты и др.).
3. Третья группа определяется химическим составом. В производстве продукции из них требуется глубокий химико-технологический передел. Основной фактор оценки ресурсов – прогноз геохимических обстановок (апатит, фосфориты, сера, флюорит, соли и др.). Некоторые минералы в зависимости от направления использования могут быть отнесены к различным группам.

Сырье третьей группы может иметь глубокий химико-технологический передел, что их сближает по технологии переработки с металлами.

В стратегии развития МСБ Европейского Союза приоритетное место отводится критическим металлам и промышленным минералам для устойчивого развития технологий и потенциального воспроизводства металлов и промышленных минералов для будущего. На основе анализа российского и международного опыта развития северных территорий и сообществ важное значение имеют минеральные ресурсы, что играет немаловажную роль в научном и практическом видении будущего Севера и Арктики России. Минерально-сырьевые ресурсы Республики Карелия – неотъемлемая часть инфраструктуры горной промышленности северной Европы. Возможности сотрудничества отдельных регионов зачастую очень ограничены. Поэтому необходимо использовать уже существующие системы сотрудничества. На Севере ведущее значение приобретает регион Баренцева сотрудничества. Начиная с 1993 года, Баренцево сотрудничество стимулировало развитие взаимоотношений, укрепляло доверие и дружеские связи на всей своей территории. Трансграничное сотрудничество способствовало сближению Норвегии, России, Швеции и Финляндии и может рассматриваться как один из основополагающих факторов по совместным исследовательским проектам в области региональных минеральных ресурсов, активного промышленного развития и связанных с ним экологических проблем. В.А.Шлямин [14], анализируя стратегию «Северное измерение», рассматривал один из сценариев – это создание единого экономического пространства. Здесь есть привлекательность и соответствие как европейским, так и российским ожиданиям, что является составной частью общей стратегии социально-экономического развития региона. В свою очередь стратегическое планирование осуществляется во взаимоотношениях с

федеральным центром. И здесь налицо проявляется неготовность государственных органов и многих предпринимателей к институциональным и технологическим преобразованиям, что сказывается на инвестиционной привлекательности.

Близкий автору пример – это Баренц-регион. Он богат природными ресурсами. Хороший менеджмент и устойчивое использование природных ресурсов являются решающими для трудоустройства и экономического роста территории. Баренц-регион относится к важному источнику металлов и промышленных минералов. Благодаря резкому увеличению спроса на минеральные ресурсы Баренц-региона миллиарды евро в северных странах будут инвестироваться в горную добычу и обогащение полезных ископаемых. Большой объем финансирования в этих странах планируется на развитие самой инфраструктуры горной промышленности. Геологическая информация предоставляется для общества в течение более чем 150 лет [1, 15]. Еще государственная геологическая информация и знания различаются внутри и между различными странами, но внедрение новых технологий расширяет информацию. Геология не имеет границ, а международная кооперация является существенной для того, чтобы обмениваться знаниями и обеспечивать общество высококачественной информацией. Геологические службы Финляндии, Норвегии и Швеции кооперируются на начальной стадии для того, чтобы обсудить конкретные меры, нацеленные на выполнение задач по созданию современной инфраструктуры в районе Баренц-региона. Следует заметить, что энергоемкость ВВП России в 3–5 раз превышает аналогичный показатель Норвегии, Финляндии и Швеции [16].

В принятии решений определяющим становится доступность объекта, которая является функцией геологии, технологии, окружающей среды, социальных, политических и экономических факторов. Доступность и надежность запасов может оцениваться разнообразными рыночными специфическими факторами такими, как отношение мировых запасов минерального сырья к объему продукции, зависимостью от импорта, степенью размещения продукции в относительно небольшом числе горных компаний и стран. Комбинация важности использования и доступности запасов может определять критичность металла или промышленного минерала в заданном масштабе времени. Останавливаясь на понятии «доступность», целесообразно привести формулировку, данную А.А.Пешковым и Н.А.Мацко [17]: «Доступность минерально-сырьевых ресурсов – это свойство системы общество-минеральные ресурсы, характеризующее возможность их эффективного и безопасного использования в зависимости от состояния ресурсов, потребности в них и достигнутого технологического уровня» (стр.12).

## Приоритеты минералого-технологических исследований

Новое дыхание технологической минералогии в XXI веке определяется объективной необходимостью совершенствовать технологические процессы, разрабатывать и научно обосновывать новые технологические подходы и технические решения в связи с вовлечением в промышленную сферу совершенно новых металлов и химических элементов, минерального сырья техногенного происхождения. Значительно повышается и усиливается внимание к комплексному использованию минерального сырья.

Технологическая минералогия стоит в авангарде современных направлений, потому что выполнение цели и решение задач определяются на начальном этапе уровнем развития методов технологической минералогии. Сюда также включаются геолого-петрологические и петрохимические методы [18, 19]. Новые технологии освоения направлены на вовлечение труднообогатимого и упорного сырья. Разработка нового класса материалов на основе минерального сырья и повышение качества сырья до уровня чистых и суперчистых концентратов могут осуществляться за счет интенсификации технологий обогащения различных руд металлов и промышленных минералов на основе направленного изменения свойств минералов (криовоздействие, активация, выщелачивание, воздействие ультразвуком, химически активной плазмой, СВЧ-излучение, протонное облучение, воздействие мощными электромагнитными импульсами, ионная имплантация и др.) [20, 21].

В основу решений научных задач в этой области должно быть заложено понятие, что минералы (агрегатные скопления) представляют собой закономерные природные химические

полисоединения. Минеральные многокомпонентные системы исследуются с применением аналитических методов и приборов нового поколения. РЗМ используются в производстве в очень малых количествах и называются «металлами-пряностями». Выделять подобные дефицитные элементы чрезвычайно трудно [19, 22]. Такие минералы, как правило, относятся к акцессорным. Вот так выглядит перечень наиболее распространенных минералов, содержащие важные редкие и редкоземельные элементы, некоторые из которых уже были упомянуты выше, – эшинит, алланит, апатит, бастнезит, бритолит, броккит, церит, флюоцерит, флюорит, стиллуэллит, синхизит, титанит, уэкфелдит, ксенотим, циркон, гадолинит, монацит, паризит и др.

Индий, относящийся к группе шести крайне критически важных металлов, имеет недостаточные объемы производства рафинированного металла (табл. 2).

Таблица 2. Производство рафинированного индия в мире по странам

| Страна | Рафинированный продукт в тоннах | |
|---|---|---|
| | 2010 | 2011 |
| Бельгия | 30 | 30 |
| Бразилия | 5 | 5 |
| Канада | 67 | 65 |
| Китай | 340 | 340 |
| Япония | 70 | 70 |
| КНДР | 70 | 100 |
| Перу | 6 | 20 |
| Россия | нет данных | нет данных |
| Другие страны мира | 27 | 30 |

Импорт (2007–10): Китай, 31 %; Канада, 25 %; Япония, 16 %; Бельгия, 9 %; и другие страны, 19 %. Цена – 800 $/кг. Источник USGS, 2012

Из краткой характеристики известного нахождения индия в минералах видно, что присутствие индия (следы) отмечается в сульфидах (халькопирит, сфалерит и станнин) в результате ионного обмена. В месторождениях цинка среднее содержание индия составляет 1 ppm. Геохимические свойства индия определяют его присутствие в металлах меди, свинца и олова, в меньшей степени – висмут, кадмий и серебро.

В жильных месторождениях олова и вольфрама штокверкового типа известны относительные концентрации индия. Однако из этого типа весьма трудно извлечь индий. Отмечается появление индия и в других образованиях, например, колчеданные руды в вулканитах, эксгаляционные осадки, полиметаллические месторождения жильного типа, эпитермальные месторождения, скарны и др.

Надо обратить внимание, что технологии рециклинга заняли в некоторых развитых странах важное место в качестве источника сырья, из которого можно извлечь металл. В Германии доля вторично используемой меди доходит до 54 %. Это самый высокий показатель в мире (ЕС – 45 %, США – 41 %, весь мир – 13 %), а по стали доля рециклинга в Германии составляет 90 %.

В настоящее время вторичными источниками редкоземельного сырья являются электронно-лучевые трубки (люминофор), отработанные катализаторы и нейтрализаторы выхлопных газов, отходы производства магнитов. Остальные вторичные источники не имеют серьезного значения.

Как правило, все руды редких и редкоземельных металлов являются комплексным сырьем, требующим индивидуального подхода к каждому объекту. В каждом конкретном случае выход и качество конечной продукции диктуется экономическими соображениями, определяющими целесообразную глубину и степень переработки. На этом этапе все шире будут вовлекаться нетрадиционные и новые виды минерального сырья, включая бурный рост потребностей рынка в РЗЭ. В связи с этим и другими обстоятельствами необходимо иметь полную и достоверную информацию о составе, строении и технологических свойствах рудоносных объектов. Именно таким образом можно получить оценку качества и технологичности нетрадиционного и нового минерального сырья, ранее не эксплуатировавшихся геолого-промышленных типов [19].

Качественный скачок в практике переработки руд следует ожидать с разработкой и внедрением новых более эффективных способов дезинтеграции. Повышение технологической эффективности следует искать в создании новых перспективных способов дезинтеграции минерального сырья.

Мировой опыт показывает, что в настоящее время наиболее перспективным при измельчении минерального сырья до крупности 100 мкм является использование роллер-технологий, при которых происходит интенсивное образование готовых к обогащению классов крупности [22, 23], а удельные расходы энергии сопоставимы с расходами при дроблении. В настоящее время ряд зарубежных предприятий освоили выпуск роллер-прессов (измельчительные валки высокого давления) различных конструкций. Совмещение операций предварительного грохочения с процессами отмывки позволит значительно расширить область применения роллер-технологий.

Результаты на фундаментальном уровне по изучению процессов разрушения доложены на недавно прошедшем в Петрозаводске (сентябрь 2012 г.) международном совещании «Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья» (Плаксинские чтения-2012) [24].

Современные стратегии освоения отдельных месторождений должны предусматривать возможность предотвращения и компенсации негативных воздействий внешней среды, что положительно влияет на рыночную конъюнктуру, рождает быстрое реагирование на благоприятные экономические ситуации.

Использование аппаратуры высокого уровня позволяет выявлять причины нетехнологичности сырья и предлагать новые подходы для совершенствования оценок. Один из примеров ниже. Именно за счет новых приборов разработка в ИГ КарНЦ РАН эффективных технологий обогащения кварцевого сырья позволила сделать существенный шаг вперед. Минералогические, структурно-петрографические исследования кварца проводились с использованием стандартных оптико-минералогических методов, а также с использованием современного сканирующего электронного микроскопа VEGA II LSH и микроанализатора INCA ENERGY 350, рамановского микроскопа и микроанализатора Nicolet Almega XR. Анализ поверхности минералов, форм срастания осуществлялся с использованием современного лазерного микроскопа Color 3D Laser Microscope Keyense VK-9710K. При исследованиях дефектности кварцевой структуры использованы прецизионные методы ЭПР, РСА, электронной микроскопии. Анализ элементов-примесей в кварцевых концентратах проводился методом ISP MS в лаборатории Курчатовского института (Москва). Анализ водных вытяжек газово-жидких включений (ГЖВ), полученных термическим способом, осуществлялся методами ионной и газовой хроматографии (ИГЕМ РАН) и методом ISP MS в лаборатории ЦНИГРИ (Москва).

## Заключение

Современные стратегии освоения отдельных месторождений должны предусматривать возможность предотвращения и компенсации негативных воздействий внешней среды, а также быстро реагировать на благоприятные экономические ситуации.

Основной принцип предусматривает освоение месторождений в том виде, в каком его создала природа. Георесурсы надо довести до состояния наиболее приемлемого для извлечения с использованием современных технологий.

Новый принцип, способствующий инновациям, заложен в основу семантического понятия «доступность». Доступность минерально-сырьевых ресурсов – это свойство системы общество-минеральные ресурсы, характеризующее возможность их эффективного и безопасного использования в зависимости от состояния ресурсов, потребности в них и достигнутого технологического уровня.

В числе основных экономических задач страны важное место должно занимать освоение металлического и индустриального минерального сырья на современных принципах.

В этом отношении хотелось бы закончить статью цитированием профессора Е.А.Козловского, министра геологии СССР (1975–1989 гг.) [3, стр. 841] «Нам представляется, что для того чтобы грамотно реализовывать планы, особое внимание надо уделять национальной идее обновления общества и хорошо продуманной политической линии. При этом важно, чтобы она была ясна всем и получила одобрение и поддержку общества. А это не так просто! Нужна кропотливая работа с обществом, чтобы оно имело возможность многократно убедиться в том, что серьезные идеи под силу умным и ответственным людям.

В российском обществе накоплена критическая масса ожиданий того, что справедливость в использовании общенациональных богатств восстановится**…»**

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mineral deposits and metallogeny of Fennoscandia* // Eilu, P. (ed.) Geological Survey of Finland. Special Paper 53. 401 p.
2. *Кривцов А.И., Беневольский Б.И., Минаков В.М.* Национальная минерально-сырьевая безопасность. М.: ЦНИГРИ, 2000.196 с.
3. *Козловский Е.А.* Россия: минерально-сырьевая политика и национальная безопасность. – М.: Изд.МГГУ, 2002. 856 с.
4. *Концепция долгосрочного социально-экономического развития* Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р.
5. *Grasso, V.B.* Rare Earth Elements in National Defense: Background, Oversight Issues, and Options for Congress // Congressional Research Service. Report for Congress 7-5700, June 8, 2011. www.crs.gov
6. *Rare Earth Materials in the Defense Supply Chain*, U.S. Government Accountability Office (GAO), – 10-617R,April 14, 2010, p. 19, http://www.gao.gov/new.items/d10617r.pdf.
7. *Minerals, Critical Minerals, and the U.S.Economy.* – Prebublication Version – Subjects Further Editorial Revision. The national Academies Press Washington. D.C., 2011. 170 p.
8. *Rare earth elements – opportunities and challenges* – Ernst & Young's Global Mining & Metals Center November 2010.
9. *Buchert, M., Schüler, D. & Beher, D.* Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Öko-Institute.V., Freiburg. United Nations Environment Programme, Paris, 2009. 82 p.
10. *Winter, J.* 3-D Chip scale with lead-free processes // Journal “Semiconductor International” № 10, 2003.
11. *Новоселов А.Р., Косулина И.С., Клименко А.Г., Паулиш А.Г.* Индиевые столбы для flip-chip технологии матричных фотоприемных устройств на основе пленок Cd-Hg-Te, выраженных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. № 3, 2008.
12. *Щипцов В.В., Шеков В.А.* О концепции развития минерально-сырьевой базы Республики Карелия // Горный журнал. № 5, 2012. С.8–13.
13. *Еремин Н.И.* Неметаллические полезные ископаемые. М.: Изд-во МГУ, 2007. 459 с.
14. *Шлямин В.А.* Россия в «Северном измерении». – Петрозаводск: ПетрГУ, 2002.192 с.
15. *A Natural Resource Strategy for Finland:* Using natural resources intelligently. 8.4.2008, Sitra https://www.sitra.fi pdf.
16. *Орлов В.П.* Проблемы недропользования (2000–2006). – М.: Геоинформмарк, 2007. 464 с.
17. *Пешков А.А. Мацко Н.А.* Доступность минерально-сырьевых ресурсов. М.: Наука, 2004. 280 с.
18. *Изоитко В.М.* Технологическая минералогия и оценка руд. СБ.: Наука, 1997. 582 с.
19. *Козлов А.П.* Современные методы минералого-технологических исследований – основа прогнозирования и разработки высокоэффективных технологий обогащения нетрадиционного минерального сырья // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Мат.межд.совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С.16–18.

20. *Чантурия В.А.* Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Горный журнал., 2005, № 12. С.56–64
21. *Лыгина Т.З.* Комплексная переработка неметаллических полезных ископаемых – как основа инновационных проектов // Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 28–34.
22. *Баранов В.Ф.* Обзор мировых достижений и проектов рудоподготовки новейших зарубежных фабрик. // Обогащение руд. 2008. – №1. С. 8–12.
23. *Баранов В.Ф., Вайсберг Л.А.* Тенденции развития технологии и техники рудоподготовки // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Мат.межд.совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С.12–16
24. *Современные методы технологической минералогии* в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья // Под ред. В.А.Чантурия и В.В.Щипцова. Мат.межд.совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 398 с.

# ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ

***Ожогина Е.Г.*** vims-ozhogina@mail.ru **,** ***Рогожин А.А.*** rogojin@df.ru

ФГУП «ВИМС», Москва

**Ухудшение качественных характеристик ресурсного потенциала отечественного** минерально-сырьевого комплекса привело к тому, что в промышленное освоение вовлекаются низкокачественные, нередко комплексные руды, довольно часто залегающие в сложных ландшафтно-климатических и горно-геологических условиях. В связи с этим резко возрастает роль оценки качества полезных ископаемых минералогическими методами. Необходимость такой оценки на всех стадиях изучения и освоения недр очевидна, так как позволяет с минимальными затратами получить данные об исходном сырье, его технологических свойствах, прогнозировать технологию переработки и качество ожидаемых продуктов, в том числе и товарных. В соответствии с действующими требованиями особое внимание сегодня уделяется оценке качества полезных ископаемых на ранних стадиях геологического изучения сырьевого объекта.

При оценке качества полезных ископаемых приемы и методы прикладной минералогии являются главным инструментом повышения эффективности геологоразведочных работ и рационального использования минерального сырья. Однако существенный прогресс в области познания реального состава, строения и свойств минералов и их ассоциаций, а также технических средств и методов минералогических исследований внесли определенные изменения в подходах к оценке качества полезных ископаемых. Современные подходы к оценке качества сырья в целом определяются требованиями к его изучению и тесной взаимосвязью ресурсных и технологических проблем, решить которые можно создав новые эффективные технологии комплексного использования полезных ископаемых, предусматривающих максимально возможное извлечение всех полезных минералов, использование технологических свойств руд и (или) пород и утилизацию отходов.

Минералогические особенности современных руд (полиминеральный состав, одновременное присутствие нескольких минеральных ассоциаций, количественное соотношение минералов, сложный текстурно-структурный рисунок, в том числе варьирующий гранулометрический состав рудных фаз, их морфометрические параметры, обуславливающие характер взаимоотношения рудообразующих минералов, реальные состав и строение минералов, близость физических свойств минералов), определили конкретные требования к изучению вещественного состава полезных ископаемых. Это:

1. Применение рационального комплекса минералого-аналитических методов исследования, оптимального для конкретных видов сырья, позволяющего получить необходимую и достаточную информацию об объектах исследования.

2. Системный подход к минералогическим, аналитическим и технологическим исследованиям на разных стадиях геологоразведочных работ.

3. Метрологическое обеспечение всех видов минералого-аналитических работ, необходимое для получения достоверных данных и контроля качества результатов анализа.

При оценке качества минерального сырья и в дальнейшем при создании технологий его передела используется комплекс физических методов, позволяющий определить количественный минеральный состав, морфоструктурные характеристики минералов, их состав, строение и свойства. Применение комплекса методов исследования (оптическая микроскопия, рентгенография, рентгенотомография, электронная микроскопия, термический и микрорентгеноспектральный (зондовый) анализы, магнитометрия и др.) вполне оправдано. Используя минералогические методы, можно четко проследить, например, распределение и поведение полезного и (или) токсичного минералов в исходной руде и продуктах ее обогащения, характер сростков минеральных фаз, их гетерогенность, влияние физических свойств на дезинтеграцию (твердость, хрупкость) и сепарацию (плотность, удельная магнитная восприимчивость). При этом возможны различные варианты комплексирования методов изучения сырья в зависимости от его минералогических особенностей и круга решаемых задач.

Прогнозная оценка качества полезных ископаемых, проведенная на ранних стадиях геологического изучения месторождения (рудопроявления), в дальнейшем оптимизирует управление технологическими процессами при его освоении. Поэтому совершенно очевидна необходимость системного подхода к минералого-аналитическим исследованиям на разных стадиях изучения сырьевого объекта. Вся информация должна сохраняться, накапливаться и анализироваться во всей совокупности по мере детализации. Как показывает опыт, минералогическая информация, полученная на ранних стадиях изучения рудопроявления и (или) месторождения оказывается весьма полезной, в том числе при решении технологических проблем, возникающих при его отработке или геолого-экономической переоценке.

Для обеспечения достоверности и сопоставимости результатов анализов необходимо метрологическое обеспечение всех видов минералогических работ, в первую очередь, выражающееся в дальнейшем развитии и стабильном функционировании системы управления качеством минералогических исследований. Система включает стандарты, регламентирующие контроль качества измерений на всех этапах работ, порядок разработки и аттестации методик количественного минералогического анализа, а также массовых анализов минералов, руд и горных пород, создание средств метрологического контроля, в том числе стандартных образцов фазового состава и свойств минералов.

Важным моментом минералогических исследований являются научно-обоснованные нормативно-методические документы, обеспечивающие единство и требуемую точность измерений, достоверные результаты при минимуме материальных затрат. Все определения независимо от степени сложности объекта должны выполняться строго в соответствии с нормативными документами, излагающими методику выполнения анализа. В настоящее время обеспеченность минералогических работ нормативно-методическими документами достаточно высокая. Главными являются методики количественного минералогического анализа. Также существуют методики, позволяющие не только идентифицировать минерал, выявлять смешаннослойные фазы, рассеянную тонкодисперсную минерализацию, определять особенности реального строения минералов, нередко являющиеся типоморфными и определяющими технологические свойства минералов и руд в целом.

В качестве примера остановимся на прогнозной оценке качества болотных железо-марганцевых руд, обнаруженных на Верхне-Вольинской площади (Полярный Урал). Руды, содержащие 34,8 % $MnO_2$, 10,8 % $Fe_2O_3$ и 2,28 % $P_2O_5$, были изучены комплексом

минералогических методов, включающим оптическую микроскопию, рентгенографию, рентгенотомографию и растровую электронную микроскопию, привлеченную для решения конкретной задачи – определения характера локализации фосфорсодержащей фазы.

Железо-марганцевые руды в основном пятнистой текстуры, обусловленной неравномерным распределением рудных агрегатов бурого, буро-черного, черного цвета и глауконита, отличающегося зеленой окраской разных оттенков, имеют скрытокристаллическую метаколлоидную структуру. Для руд типичны гроздевидные, почковидные, оолитоподобные, концентрически-зональные колломорфные образования (рис. 1). Гипергенные процессы в определенной степени привели к появлению наложенных текстур (цементной, тонко-прожилковой, участками порошковатой) и структурных элементов, выражающихся в разрывах и смещениях концентрических слоев в колломорфных образованиях.

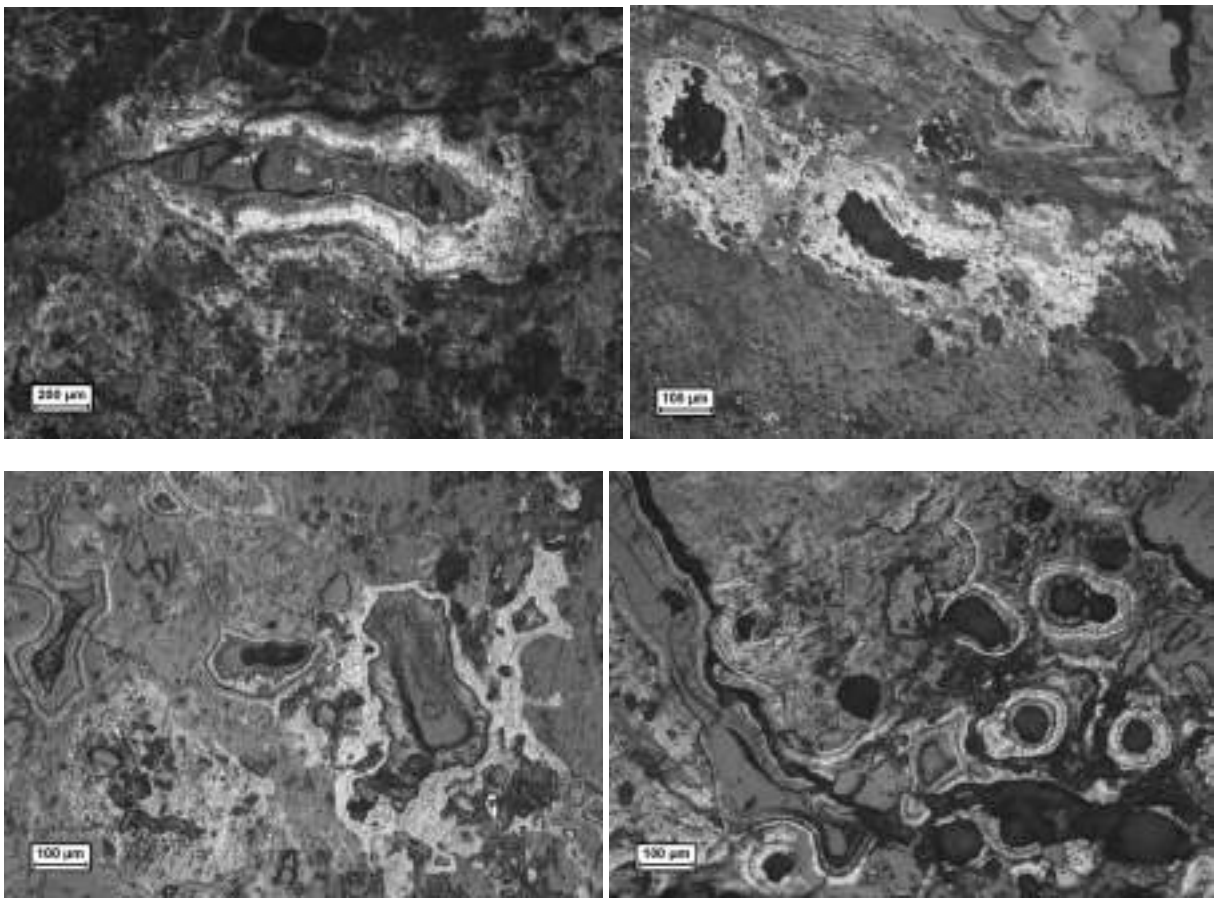



**Рис. 1 Текстурно-структурные особенности железо-марганцевых руд. Отраженный свет. Николи параллельны**

Минеральный тип руд – гетит-рансьеит-псиломелан-вернадитовый. Главные рудные минералы: псиломелан (15 %), рансьеит (14 %), вернадит (17 %), гетит (7 %) преимущественно присутствуют в тесной ассоциации друг с другом и надежно идентифицируются рентгенографическим анализом. В подчиненном количестве встречаются тодорокит, пирит, алабандин и сфалерит. Главными породообразующими минералами являются кварц (16 %), представленный преимущественно обломками полуокатанной формы псаммитовой и алевритовой размерности, и глауконит (13 %) в различной степени гидратированный и ожелезненный, в виде агрегатов со сглаженными очертаниями. В подчиненном количестве отмечаются полевые шпаты, родохрозит, доломит. Содержание апатита в руде составляет 4 %. Апатит приурочен к тонкодисперсному железо-марганцевому материалу и присутствует в виде удлиненных зерен размером менее 1 мкм.

Минералогическими исследованиями установлено, что данные руды не представляют промышленной ценности. Несмотря на то, что морфоструктурные характеристики руды в целом благоприятны для раскрытия марганцевых агрегатов механическими методами, следует иметь в виду:

1. Природные срастания минералов, в первую очередь рудных и глинистых (глауконит), не позволят при обогащении селективно выделить рудные минералы (минеральные агрегаты) без существенных потерь**;**

2. Значимое количество (порядка 50 %) марганцевых минералов, тесно ассоциирующих между собой, не даст возможности селективно выделить конкретные минеральные виды в отдельные продукты;

3. Глауконит, особенно его гидратированные разности, будут негативно влиять на обогатительные процессы;

4. Вредная примесь фосфора, представленная апатитом, может быть только частично удалена механическими методами, поэтому для получения кондиционных по фосфору продуктов потребуется химическое обогащение.

Для обогащения этих руд потребуются комбинированные технологии, что в целом нерентабельно, так как распространение их в природе весьма ограничено.

В последние годы наметилась явная тенденция к оценке качества нефтегазоносных толщ – коллекторов методами прикладной минералогии. Это в первую очередь связано с проблемой извлечения остаточной нефти из карбонатных и терригенных пород-коллекторов. Сегодня обсуждается вопрос о «матричной нефти» (высокомолекулярных углеводородах) в нефте-газо-конденсатных породах. Можно с уверенностью говорить, что выявить, идентифицировать и изучить форму нахождения «матричной нефти», имеющей нанометрическую размерность, в недалеком будущем удастся методами прикладной минералогии, используя методические приемы изучения тонкодисперсных минеральных систем.

В заключение следует отметить, что минералогические исследования при технологической оценке сырья являются базовыми и сквозными, по существу, они всегда представляют собой прогнозную оценку качества сырья: при геологоразведочных работах, в том числе на ранних стадиях, при создании технологий переработки руд, при контроле технологических процессов, при ликвидации последствий промышленной переработки руд.

## ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ МИНЕРАЛОВ КАК МЕТОД ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

***Котова О.Б.***

ИГ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, kotova@geo.kom/sc.ru

Современные горноперерабатывающие производства в связи с истощением запасов богатых руд вынуждены вовлекать в переработку труднообогатимое, бедное минеральное сырье, характеризующееся тонкой вкрапленностью вплоть до эмульсионной с низкой контрастностью технологических свойств разделяемых минералов. С вступлением России в мировой рынок резко повысились требования, как к технологическим, так и к экологическим параметрам концентратов. Все это предполагает необходимость, во-первых, получения глубоких знаний о минералах как носителей необходимых химических элементов и полезных свойств, особенностей их реальной кристаллической структуры; во-вторых, разработки новых, наукоемких, экологически безопасных технологий, обеспечивающих эффективное комплексное извлечение ценных компонентов из руд и техногенных образований; в-третьих, понимания механизмов изменений параметров минералов под влиянием природных и техногенных воздействий; в-четвертых, получения готовой продукции, конкурентоспособной на мировом рынке; в-пятых, разработки новых подходов к проведению оценки качества минерального сырья [1–5].

Инновационный подход к минералого-технологической оценке минерального сырья (природного и техногенного) является определяющим для эффективного освоения минерального сырья и заключается в интеграции минералогических методов исследований (включая их новые технологии) с развитием эксперимента в технологиях рудоподготовки и обогащении полезных ископаемых [5–7].

*Свойства минералов* обусловлены их кристаллической структурой и химическим составом. Они являются основой диагностики минерала, учитываются при освоении полезных ископаемых, при обогащении, комплексной переработке руд и применении.

Сегодня эпицентр исследований минерала – его реальная, дефектная структура на микро- и наноуровнях. Все прорывные достижения в минералогии обязаны внедрению и развитию физических методов исследования вещества (новые минералы, новые материалы с экстремальными свойствами и т.д.). Особый интерес проявлен исследователями к выявлению зависимости морфологии и свойств от размеров индивидов. Показана специфичность структуры и свойств наноразмерных частиц в отличие от микро и макрочастиц [7, 9]. Полученные результаты привели к осознанию необходимости учета размерных факторов в технологических процессах. При достаточно малых размерах минеральных частиц, для которых $V/S \leq L$, где S – площадь поверхности; V – объем кристаллов; L – длина экранирования (обычно $L \approx 10^{-4} - 10^{-5}$ см) необходимо учитывать влияние адсорбофизических полей на все процессы, протекающие в тонкодисперсных минеральных системах, включая закономерности энергетического контроля процессов минералообразования в горных породах и рудах [7, 10, 12].

Изменение свойств минерала при переходе из одной фазы в другую происходит в пределах пограничного слоя, который обычно и называют *поверхностью*. В отличие от *физики минералов* (раздел минералогии, посвященный изучению физических (магнитных, люминесцентных, электрических, тепловых и др.) свойств минералов.) *физика поверхностей минералов* изучает структуру и состав поверхностей минералов, то есть пограничных слоев между минералом и соседней фазой (твердой, жидкой, газовой, включая вакуум), а также физические явления на поверхностях, используя широкий набор экспериментальных и теоретических методов, список которых постоянно пополняется.

Как научное направление физика поверхностей минералов сложилось в конце прошлого века благодаря прорывным технологиям исследовательских средств, интеграции идей физиков и химиков, результаты исследований этого направления все чаще используются для прогнозной оценки их технологических свойств.

Физические свойства минерала в поверхностном слое, как правило, заметно отличаются от его свойств в объеме. На поверхности минералов со свойствами диэлектриков могут возникнуть электрические заряды в результате нагревания (пироэлектричество, например, в турмалине), давления, сжатия, растяжения (пьезоэлектричество в кварце) и трения (трибоэлектричество). Есть такие свойства, которые характерны только для поверхностей минеральных систем, включая адсорбофизические свойства, которые проявляются у минералов при нарушении адсорбционно-десорбционного равновесия (адсорбоэлектрические, адсорбомагнитные, адсорбооптические, адсорболюминисцентные свойства). Поверхностные свойства и особенности структуры широко используются на разных стадиях освоения минералов тонких классов для оценки их технологических свойств как обоснования тех или иных методов обогащения, предварительной обработки и т.д.

Например, перед фотометрической сепарацией руды для повышения ее эффективности необходимо учитывать физико-химические свойства поверхности разделяемых минералов, чтобы увеличить различие в их цвете и других технических параметрах, включая коэффициент диффузного отражения (КДО). При обогащении бокситов, включающем классификацию по крупности и фотометрическую сепарацию, боксит перед классификацией подвергается обжигу. Обжиг позволяет подготовить поверхность разделяемых минералов к фотометрической сепарации. В процессе обжига различные литологические разновидности бокситов ведут себя по-разному. Глинистые и рыхлые разновидности, отдавая влагу, разрушаются. Каменистые разновидности в зависимости от содержания оксидов железа приобретают различную окраску. Слабожелезистые разновидности, по сравнению с исходным состоянием, светлеют, а сильножелезистые, наоборот, темнеют. Это приводит к повышению показателя признака разделения фотометрической сепарации (КДО). Повышение различия в цвете

литологических разновидностей боксита, что отражается в расширении диапазона КДО, за счет предварительного обжига позволяет при осуществлении фотометрической сепарации извлечь сидериты в хвосты (снижается содержание оксидов железа) и тем самым повысить качество бокситового концентрата. В результате обжига происходит удаление влаги из боксита, что благоприятно сказывается на классификации по крупности: не происходит налипание частиц тонкодисперсного боксита на карбонаты и соответственно не происходит потерь боксита с карбонатами, идущими в хвосты. Это приводит к повышению выхода бокситового концентрата. В целом применение обжига перед классификацией позволяет в процессе классификации и фотометрической сепарации повысить выход обогащенного боксита и улучшить его качество повысить содержание $Al_2O_3$ и кремниевый модуль [8].

Изучение распределения минералов в продуктах обогащения красных шламов показало, что по магнитным свойствам гематит и шамозит не разделяются, а концентрируются в магнитных продуктах равномерно, что говорит об одинаковой магнитной восприимчивости минералов и низкой эффективности их разделения магнитными методами [10]. Уже предварительные эксперименты по выявлению влияния состояния поверхности на обогащение красных шламов убедительно показывают необходимость учитывать структуру гидроксильного покрова, а именно соотношение поверхностных ОН-групп первого и второго рода. Такой подход перспективен для частиц малых размеров.

Таким образом, *модифицирование структуры поверхности* и *свойств минерального сырья* – реальный способ увеличить низкое извлечение полезных компонентов (редких металлов и т.д.) при обогащении труднообогатимых руд, которое обычно обусловлено их сложным вещественным составом, высокой массовой долей тонко-вкрапленных рудных минералов и неполнотой их раскрытия при дезинтеграции, близостью физико-химических свойств рудных и породообразующих минералов, часто ожелезненностью поверхности разделяемых минералов.

Одним из эффективных способов модифицирования минерального сырья является наноструктурирование в результате различных методов воздействия на поверхность минерального вещества. Анализ энергозатрат по стадиям сверхтонкого измельчения (выше 80 кВт/ч) современных технологий переработки минерального сырья [11] показывает, что развиваемые энергетические (включая лазерные) методы воздействия на вещество – представляются конкурентоспособными по энергозатратам, при этом обладают высокой степенью управляемости процесса.

Исследования, проводимые нами в этом направлении, позволили предложить способ подготовки к обогащению маложелезистых бокситов. Изобретение принадлежит к области обогащения маложелезистых бокситов и может применяться при предварительной подготовке к обогащению, например, при переработке бокситов с предварительным обогащением на титан и образованием корундовых фаз, что позволяет повысить комплексность и эффективность переработки боксита. Комплексность переработки бокситов реализована не в полной мере, в основном на редкоземельные элементы. Технический результат достигается тем, что способ подготовки к обогащению маложелезистых высокоглиноземистых бокситов включает грубую подготовку поверхности и последующее облучение.

Инициаторами поглощения лазерного излучения будут минеральные фазы с большей поглощательной способностью (так же на поглощение влияют температуры плавления и испарения вещества, летучесть и др.), причем поглощательная способность инициатора на протяжении лазерного импульса увеличивается за счет термоэмиссии и фотоэффекта. Эти процессы ведут к испусканию электронов, что увеличивает поглощение.

Таким образов, предложенные способы могут быть достаточно эффективно использованы для сложного минерального сырья, полезные компоненты которого имеют значительное различие в коэффициентах поглощения.

Следует отметить, что достаточно высокое содержание титана в бокситах (до десятка процентов) является основанием для проведения исследований в области разработки способов получения концентратов соединений титана из бокситов. Один из таких способов был предложен на основе дробления и разделения в тяжелых жидкостях за счет большей плотности титановых соединений по сравнению с соединениями алюминия [8]. Основной

недостаток этого способа заключается в необходимости использования вредных тяжелых жидкостей (трибромметан, жидкости Туле и Клеричи), что является неблагоприятным экологическим фактором, кроме того имеет место переход в тяжелую фракцию соединений железа.

Предложенный нами способ подготовки к обогащению маложелезистых бокситов относится к немеханическим способам воздействия и позволяет избегать переизмельчения в ходе утилизации минерального сырья. Воздействие лазерного излучения на минеральное вещество еще недостаточно изучено и несет в себе много потенциальных возможностей. В работе [14] показано, что при облучении минерального вещества лазером возможно получать спёки различного состава, в том числе и чистый металл. В работах [12, 13] изучены механизмы образования новых фаз под действием плазмы на минеральное вещество.

Развиваемые нанотехнологии предполагают, во-первых, изучение и внедрение механизмов извлечения ценных компонентов на молекулярном, атомарном и электронном уровнях, когда появляется возможность управления технологическими процессами на уровне формирования полезного компонента, во-вторых, наноструктурирование минерального вещества для получения новых материалов. Для синтезированного наноразмерного$TiO_2$ [13] выявлены особенности физико-химических свойств, возникшие благодаря структурной реорганизации на наноуровне (топографии поверхности, сорбции, электронных свойств, включая ширину запрещенной зоны, и др.). В продолжении этих работ на основе лейкоксена Пижемского месторождения разрабатываются эффективные катализаторы для фотокаталитического разложения органических загрязнителей [16]. Достоинством последних является использование в качестве окислителя растворенного в воде кислорода воздуха. Этот метод является экологически чистым, так как продуктами реакции окисления органических загрязнителей являются углекислый газ и вода. Кроме того, сравнительный анализ экономической эффективности очистки воды при незначительном уровне ее загрязнения показал, что фотокаталитический метод является наиболее дешевым.

В заключение хотелось бы вспомнить слова В. И. Ревнивцева, который, отмечая роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы страны и выделяя основные задачи её формирования, подчеркивал, что наряду с поисками новых месторождений полезных ископаемых, необходимы поиски резервов в технологиях переработки разведанных и разрабатываемых месторождений. Эти резервы заключаются, прежде всего, в повышении эффективности технологии переработки, позволяющей вовлечь в эксплуатацию запасы забалансовых и некондиционных руд [1, 2]. Таким резервом представляется физика поверхности минералов, в том числе как метод прогнозной оценки их технологических свойств.

Работа выполняется в рамках проектов 12-5-6-016-АРКТИКА и 12-М-35-2055.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ревнивцев В.И. Роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы страны и основные задачи её формирования как нового научного направления // Материалы сессии Всесоюзного минералогического общества «Роль технологической минералогии в развитии сырьевой базы СССР». Ленинград, 1983. С. 4–20.
2. Ревнивцев В.И. О теоретических основах направленного изменения технологических и технических свойств минералов при первичной переработке полезных ископаемых. Проблемы направленного изменения технологических свойств минералов. Ленинград, 1985. С. 3–8.
3. Челищев Н.Ф. Основные направления технологической минералогии. – Изв. АН СССР. Сер. Геол., 1977, № 11, с. 86–94.
4. Трубецкой К. Н., Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. М.: Наука, 2010. 437 с.
5. Юшкин Н.П. Минералогические критерии технологической оценки природного сырья для получения исскуственных минералов // Технологическая минералогия главнейших типов месторождений. Л.: Наука, 1987. С. 9–14.

6. Пирогов Б.И. Современные проблемы технологической минералогии. Технологисческая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. С. 7–23.
7. Котова О.Б. Поверхностные процессы в тонкодисперсных минеральных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 194 с. Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар: Геопринт, 1999. 216 с.
8. Бушинский Г. И. Закруткин В. Е. Геохимия бокситов Южного Тимана. М.: Наука, 1978. 120 с.
9. Перспективные геотехнологии // Отв. редактор Н.П. Юшкин. – Спб.: Наука, 2010. – 376 с.
10. Газалеева Г.И., Орлов С.Л., Сопина Н.А., Мушкетов А.А., Анашкин В.С., Вишняков С. Е., Климентенок Г.Н., Петров С.И., Котова О.Б. Влияние вещественного состава красных шламов на технологические показатели их обогащения // Материалы докладов Четвертого Международного конгресса в составе XVII Международной конференции «Алюминий Сибири», «VI конференции «Металлургия цветных и редких металлов», VIII Симпозиума «Золото Сибири». Красноярск, 2012. С. 267–271.
11. Кондратьев С.А., Котова О.Б., Ростовцев В.И. Межзерновые границы в процессах подготовки и обогащения труднообогатимого минерального и техногенного сырья: квантово-механические представления // Известия Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2010. № 4. С. 47–52.
12. Kotova O. Clay Minerals: Adsorbophysical Properties // Book of abstracts: 2nd International Conference on competitive materials and technology process, Miscolc-Lillafured, Hungary, p. 124.
13. Ponaryadov A.V., Kotova O.B. Reactivity of chemically modified nanodisperse anatase // Mineralogical Magazine, Vol. 75 (3), 2011, p.1658.
14. Каликов В.Н. Особенности лазерного разрушения минералов и критерии эталонирования в микроанализе. Серия препринтов «Научные доклады». Сыктывкар, 1986. 24с.
15. Котова О. Б., Петраков А. П., Тропников Е. М. Способ синтеза алмазов. Заявка № 2008126637/15(032526) от 30.06.08 согл. решения б/н от 15.06.09.
16. Ponaryadov A., Kotova O. Leucoxene and $TiO_2$ photocatalysts for water purification // Book of abstracts: 2nd International Conference on competitive materials and technology process, Miscolc-Lillafured, Hungary, p. 129.

# ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ВЫБОР ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПО ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТРУДНООБОГАТИМЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД

***Соколова В.Н.***

ФГУП «ВИМС», г. Москва, viktoriya-vims@mail.ru

Государственным балансом РФ учтено 29 месторождений марганца с запасами в количестве 232 млн т и дополнительно 22,8 млн т – забалансовых запасов. Разведанные и оцененные запасы представлены пятью промышленными типами руд, из которых хорошо обогатимыми являются лишь оксидные руды, составляющие всего 0,5 %. Остальные 95,5 % балансовых запасов руд являются труднообогатимыми. Среди них преобладают карбонатные (75 %) и окисленные (19 %), руды смешанного типа составляют 5 % и железомарганцевые конкреции (ЖМК) – 0,5 % [1].

Переработка низкокачественных и труднообогатимых руд, характеризующихся сложным минеральным составом, тонкой вкрапленностью и плохой раскрываемостью полезных минералов, присутствием различных минеральных форм вредных примесей (фосфора, кремния, железа и др.) и попутных компонентов (сульфидов цветных металлов), близостью физико-химических свойств рудных и нерудных минералов, по технологическим схемам действующих обогатительных фабрик не обеспечивает получения марганцевых концентратов, отвечающих требованиям ферросплавного производства [2].

Традиционные физико-механические методы обогащения марганцевых руд не решают проблему удаления из концентратов фосфора и кремнезема. В результате частичного снижения содержания фосфора (на 30 % отн.) соотношение массовых долей фосфора и марганца уменьшается, но получаются низкосортные концентраты, которые не могут быть использованы непосредственно для производства марганцевых сплавов и требуют дальнейшей химической доводки. Другой существенный недостаток этих методов заключается в значительных потерях марганца со шламами (до 30 %), вовлечение которых в дальнейший передел является сложной задачей. Кроме того, в процессе обогащения получаются промпродукты, не удовлетворяющие требованиям металлургического производства и требующие дальнейшей переработки.

Поэтому в последние годы значительное внимание уделяется химико-технологическим методам переработки низкокачественных и труднообогатимых руд, которые обеспечивают получение марганцевых концентратов высокого качества, способных конкурировать по содержанию примесей с лучшими рудами и концентратами мирового рынка. Существует два направления переработки марганцевого сырья с получением высокосортной продукции. Первое направление базируется на операции селективного удаления из марганцевого сырья вредных примесей (в основном фосфора, а в некоторых случаях и кремния), не затрагивая при этом марганцевой основы. Второе направление включает стадии обработки исходной руды, концентратов или промпродуктов растворами химических реагентов (вскрытие) для перевода основной части марганца в раствор с последующим выделением оксидов марганца. При этом обеспечивается возможность получения качественных концентратов с низким содержанием фосфора, кремния, железа и серы. Выбор способа вскрытия (кислотного выщелачивания, прямого кислотного восстановительного выщелачивания, сульфатно-термохимического способа и т.д.) основывается на установлении зависимости степени извлечения полезных компонентов от минерального состава руды (в первую очередь, минеральной формы марганца, его содержания, количества и вида породообразующих минералов).

В 2008–2010 гг. в ФГУП ВИМС были разработаны инновационные технологии переработки различных типов руд марганцевых месторождений и рудопроявлений Южной Сибири. Остановимся на результатах исследований по переработке практически необогатимого смешанного силикатного сырья: карбонатно-силикатного и силикатно-карбонатного (на примере руд Утхумского рудопроявления) и труднообогатимого окисленного фосфористого высокожелезистого сырья (на примере руд Сейбинского рудного узла). До настоящего времени такие руды отечественных месторождений не рассматривались с точки зрения их промышленного использования.

Проведенные исследования основаны на углубленном изучении минерального состава руд, размера и характера вкрапленности полезных минералов, их реального состава с помощью современных физических, физико-химических и химических методов анализа; основных технологических свойств руд: зависимости способа их вскрытия от вещественного состава, селективности вскрытия, выбора способа обесфосфоривания, обескремнивания и др. (рис. 1). Все виды минералогических исследований выполнены в соответствии с нормативно-методическими документами Научного Совета по методам минералогических исследований (НСОММИ).

Руды ***Утхумского рудопроявления*** характеризуются сложным составом, что в целом типично для смешанных руд, сформированных силикатами и карбонатами марганца с подчиненным развитием оксидов и гидроксидов марганца и железа, образовавшихся при частичном окислении первичных руд.

Текстура руд массивная, пятнистая, полосчатая, тонко-полосчатая и прожилковая. Структура руд изменяется от среднекристаллически зернистой до скрытокристаллической, преобладает мелкокристаллическая гетеро- и гранобластовая, пойкилобластовая. Сложный текстурно-структурный рисунок руд обусловлен гранулометрическим составом рудных фаз и их морфометрическими характеристиками (изрезанностью, удлинением), что затрудняет раскрытие минералов в классифицированном материале, причем даже в тонких классах крупности (–0,044+0 мм) не удается селективно выделить карбонаты и силикаты марганца традиционными физическими методами обогащения (гравитацией и магнитной сепарацией).

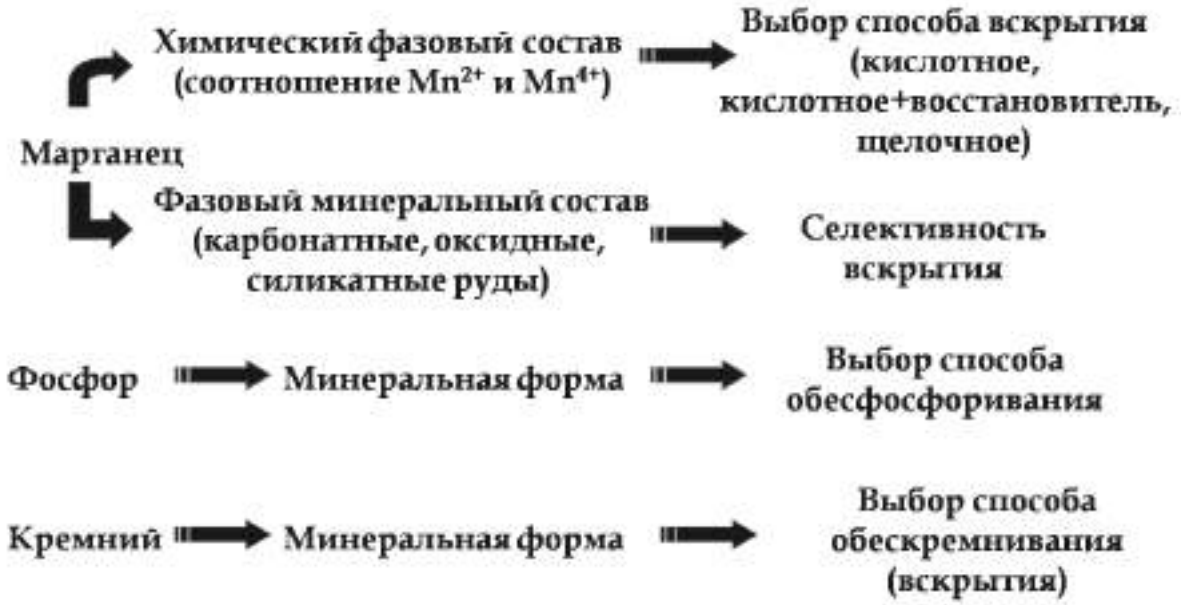



**Рис. 1. Влияние минерального состава руд на выбор способов их переработки 1.**

Главные рудные минералы представлены изоморфными дискретными рядами силикатов: группы оливина (пикротефроит-тефроит-кнебелит), пироксеноидов (пироксмангит-родонит) и группы граната (спессартин) и карбонатов марганца: группы кальцита и доломита (марганцовистый кальцит-манганокальцит-манганодоломит- кутногорит-родохрозит), присутствующими в переменном количестве и в тесной ассоциации друг с другом. Вторичные минералы представлены оксидами и гидроксидами марганца – псиломеланом, тодорокитом, вернадитом, также присутствующими в тесной ассоциации. Из акцессорных минералов присутствуют гематит, магнетит, пирит, сфен и апатит. К породообразующим минералам относятся хлорит, амфибол (роговая обманка), пироксен (диопсид), кварц, слюда.

Выявление ряда технологических особенностей смешанных силикатных руд при изучении вещественного состава с применением оптико-минералогического и рентгенографического анализов позволило ещё на начальной стадии рудоподготовки отнести эти руды к труднообогатимым [3].

Исследования проведены на двух лабораторных технологических пробах марганцевых руд, характеризующих их природные минеральные типы. Проба У-1 представлена преимущественно силикатно-карбонатной рудой. Содержание марганца 26,5 %. Главными рудными минералами являются родохрозит (25 %), кнебелит (12 %) и пироксмангит (13 %), второстепенными – тефроит и спессартин, содержание которых составляет 5 % каждого минерала. Проба У-2 имеет карбонатно-силикатный состав. Содержание марганца в ней 12,6 %. Содержание родохрозита составляет 10 %, на долю силикатов марганца приходится 29 %. Химический и минеральный составы технологических проб приведены в табл. 1, 2.

Для переработки ***силикатно-карбонатных и карбонатно-силикатных марганцевых руд*** разработана комбинированная схема рациональной переработки, включающая методы крупнокусковой рентгенорадиометрической сепарации и сухого магнитного обогащения с получением товарных карбонатных марганцевых концентратов, силикатных продуктов и отвальных хвостов. Объектами исследований химико-технологической переработки являлись некондиционные силикатные марганцевые продукты, в которых при обогащении происходит накопление труднорастворимых в кислотах силикатных минералов марганца и уменьшение содержания карбоната марганца (табл. 2).

Таблица 1. Химический состав технологических проб марганцевой руды и силикатных продуктов обогащения

| Компонент | Содержание, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Силикатно-карбонатная руда У-1 | Карбонатно-силикатная руда У-2 | Силикатный продукт (У-1) | Силикатный продукт (У-2) |
| $Mn_{общ.}$ | 26,5 | 12,6 | 25,50 | 20,87 |
| $Fe_{общ.}$ | 9,02 | 7,13 | 7,90 | 8,00 |
| FeO | 5,24 | 3,98 | – | – |
| $SiO_2$ | 30,6 | 42,3 | 32,20 | 26,80 |
| CaO | 5,87 | 7,21 | – | – |
| $P_2O_5$ | 0,38 | 0,29 | 0,37 | 0,39 |

Таблица 2. Минеральный состав технологических проб марганцевой руды и силикатных продуктов обогащения (по данным рентгенографического фазового анализа)

| Минерал | Содержание, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Силикатно-карбонатная руда У-1 | Карбонатно-силикатная руда У-2 | Силикатный продукт (У-1) | Силикатный продукт (У-2) |
| Родохрозит $MnCO_3$ | 25 | 10 | 10 | 2 |
| Тефроит $Mn_2SiO_4$ | 5 | 5 | – | – |
| Кнебелит $(Mn, Fe)_2SiO_4$ | 12 | 3 | 13 | 7 |
| Родонит $CaMn_4(Si_5O_{15})$ | 2 | 5 | 4 | – |
| Пироксмангит $MnSiO_3$ | 13 | 8 | 27 | 45 |
| Спессартин $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ | 5 | 8 | 8 | 15 |
| Кварц $SiO_2$ | 6 | 21 | 2 | 7 |
| Диопсид $CaMg(Si_2O_6)$ | 8 | 5 | 14 | 6 |
| Амфибол $Ca_2Mg_3Si_8O_{22}(OH)_2$ | 8 | 10 | 4 | 7 |

Для вскрытия силикатных продуктов обогащения с целью извлечения марганца в раствор необходимо использование нетрадиционных способов, позволяющих повысить показатели по сквозному извлечению марганца. Известно, что реагентом, обладающим избирательным действием на силикатные минералы, является плавиковая кислота – агрессивное, легколетучее вещество и, кроме того, достаточно дорогое. Применение хорошо растворимых фторидов (например, фторида натрия) в комбинации с серной кислотой приведет к образованию в пульпе плавиковой кислоты. Однако фторид натрия тоже является дорогим реагентом. В природе фтор встречается в виде флюорита (фторида кальция), который добывается для использования в различных областях промышленности и является сравнительно недорогим реагентом. В разбавленных растворах серной кислоты фторид кальция медленно разлагается с образованием фтористого водорода, который мгновенно взаимодействует с силикатными минералами. Таким образом, применение флюоритовой добавки является безопасным, так как выделения фтористого водорода происходить не будет.

Исследования по вскрытию силикатных продуктов растворами серной кислоты показали, что степень извлечения марганца в раствор составляет порядка 50–55 %. Добавка $CaF_2$ (25 % масс. к продукту) позволила увеличить степень извлечения марганца до 70–75 %. Увеличение количества вводимого $CaF_2$ (с 25 до 75 %) не влияет на повышение степени извлечения марганца.

Минералогическими исследованиями установлено полное отсутствие в кеках выщелачивания карбоната марганца – родохрозита и силикатов марганца группы оливина (тефроита, пикротефроита, кнебелита), представляющих собой дискретный изоморфный ряд. Наиболее устойчивыми являются минералы группы пироксеноидов. Происходит частичное вскрытие родонита, в структуре которого катионы представлены кальцием и марганцем, и слабое

вскрытие пироксмангита, в структуру которого изоморфно с марганцем входит железо. Не исключено, что на характер вскрытия этих минералов влияет не только катионный состав, но и присутствие одинарных цепочек тетраэдров с большим перепадом повторяемости ($[Si_nO_{3n}]$ при n>2). Частичное вскрытие наблюдается у граната альмандинового ряда – спессартина, в структуре которого изолированные цепочки $[SiO_4]$ расположены вдоль винтовой оси четвертого порядка. Породообразующие минералы (амфибол и диопсид) практически не выщелачиваются в кислотах.

Таким образом, наиболее перспективными методами переработки марганцевых руд смешанного типа являются химико-технологические, что обусловлено особенностями их минерального состава и строения, в том числе близостью физических свойств (плотности, микротвердости, удельной магнитной восприимчивости), практически исключающими возможность их обогащения традиционными физическими методами.

Руды ***Сейбинского рудного узла*** характеризуются сложным полиминеральным составом и неоднородным строением, что обуславливает их трудную обогатимость. Текстура руды землистая и порошковатая. В рыхлом материале неравномерно распространены плотные куски и желваки черного и стального цвета, сложенные оксидами и гидроксидами марганца, имеющими неровную мелко-ямчатую, реже шлаковидную поверхность. Присутствуют руды с явно выраженными вторичными структурами – сетчатыми, фонарными, каемчатыми, перистыми, образовавшиеся за счет неравномерной коррозии обломков пород и породообразующих минералов.

Из частных керновых проб были сформированы представительные технологические пробы. Рудный материал разделяли по содержанию фосфора с выделением продуктов, содержащих ≤0,3 % P и >0,3 % P. В свою очередь фракцию, содержащую > 0,3 % P, разделяли по содержанию железа на продукты <5 % Fe, от 5 до 13 % Fe и >13 % Fe. Таким образом, были сформированы четыре лабораторные технологические пробы, отличающиеся по содержанию основного компонента – марганца, а также примесей фосфора и железа: малофосфористая и маложелезистая (С-1), фосфористая маложелезистая (С-2), фосфористая железистая (С-3), фосфористая высокожелезистая (С-4).

Химический и минеральный составы исследованных технологических проб приведены в табл. 3, 4.

Пробы С–1, С–2 представляют собой преимущественно марганцевую руду со значительным содержанием кремнистого материала (обломки терригенного кварца и кремнистых пород). Пробы С–3, С–4 наряду с марганцевой минерализацией содержат значительное количество гидроксидов железа и отличаются более низким содержанием терригенного материала. Все пробы характеризуются повышенным содержанием никеля (0,15–0,31 %).

Главным рудным минералом является псиломелан, к второстепенным относятся пиролюзит, криптомелан, асболан, тодорокит, пирохроит и литиофорит, распространенные в рудах неравномерно, что отражается на их присутствии в технологических пробах. Крайне неравномерно в руде присутствует вернадит.

Таблица 3. Химический состав технологических проб марганцевой руды

| Компонент | Содержание, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Малофосфористая и маложелезистая руда С-1 | Маложелезистая фосфористая руда С-2 | Железистая фосфористая руда С-3 | Высокожелезистая фосфористая руда С-4 |
| $MnO_2$ | 24,5 | 33,2 | 29,0 | 24,5 |
| $Fe_2O_3$ | 1,65 | 4,63 | 12,7 | 16,1 |
| FeO | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| $SiO_2$ | 59,0 | 42,1 | 37,3 | 32,2 |
| CaO | 0,40 | 0,49 | 0,35 | 0,43 |
| $P_2O_5$ | 0,53 | 1,09 | 1,03 | 1,37 |

Таблица 4. Минеральный состав технологических проб марганцевой руды (по данным рентгенографического фазового анализа)

| Минерал | Содержание, % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | С-1 | С-2 | С-3 | С-4 |
| Пиролюзит $MnO_2$ | 5 | 3 | 5 | 6 |
| Псиломелан $(Ba, Mn^{2+})_3Mn_8^{4+}O_{16}(OH)_6*nH_2O$ | 30 | 25 | 42 | 24 |
| Криптомелан $K_2(Mn^{4+}, Mn^{3+})_8(O,OH)_{16}$ | – | 8 | 5 | – |
| Литиофорит $(Al,Li)(Mn^{4+}, Mn^{3+})_8(O,OH)_{16}$ | – | 2 | – | 4 |
| Асболан $Mn^{4+}O_{2-x}(OH)_x(Co, Ni, Ca)_y(OH)_{2y+x}*nH_2O$ | 5 | 5 | – | – |
| Тодорокит $(K, Ca, Mn^{2+})(Mn^{4+}, Mn^{2+}, Mg)_6O_{12}*3H_2O$ | – | 5 | – | – |
| Гетит $\alpha$-FeOOH | 1 | 3 | 11 | 24 |
| Кварц $SiO_2$ | 55 | 34 | 30 | 27 |
| Глинистые минералы + слюда | 3 | 6 | 3 | 5 |
| Крандаллит $CaAl_3(PO_3OH)(PO_4)(OH)_6$ | 1 | 4 | 3 | 1 |

Присутствие в руде гидроксидов марганца (литиофорита, халькофанита, рансьеита, асболана), содержащих цветные металлы, позволяет рассматривать ее в качестве комплексного сырья и прогнозировать возможность извлечения цветных металлов методами химического обогащения. Кобальт связан с асболаном, а цинк – с халькофанитом (пробы С–2 и С–3), обнаруженными прецизионными методами. Минеральных форм никеля не установлено, по-видимому, он находится в сорбированном виде.

Содержание железа варьирует в значительных пределах, связано оно, в первую очередь, с гетитом. Максимальное содержание железа отмечается в руде пробы С–4, в которой гетит является главным рудным минералом. В несколько меньшем количестве (12,7 %) $Fe_2O_3$ присутствует в руде пробы С–3. Невысокое содержание $Fe_2O_3$ в руде проб С–1 и С–2 связано с незначительным количеством в них гетита, в пробе С–2 – еще и ярозита. Железо в незначительном количестве может содержаться в составе слоистых алюмосиликатов.

Главными породообразующими минералами являются кварц и слоистые алюмосиликаты, представленные гидрослюдой и монтмориллонитом, в резко подчиненном количестве встречаются кальцит и доломит, иногда отмечается полевой шпат. В пробе С–3 рентгенографическим методом идентифицирован гранат.

В состав псиломелана входит барий, изоморфно замещая двухвалентный марганец, помимо этого в руде проб С–1 и С–2 присутствует собственная минеральная фаза бария – барит. В руде определены незначительные содержания ванадия, титана и хрома, однако при этом самостоятельных минеральных форм данных элементов не обнаружено.

Минеральными формами фосфора, обнаруженными в рудах комплексом минералого-аналитических методов, являются апатит и крандаллит. Апатит встречается исключительно в обломках кремнистых пород, и, вероятно, может быть удален совместно с кварцем. Непосредственно с тонкодисперсной железомарганцевой и марганцево-железной минерализацией связан крандаллит. Повышенное содержание фосфора в пробах С–2, С–3, С–4 представляет серьезную проблему при их технологической переработке, поскольку фосфор, присутствующий в руде в виде механической тонкодисперсной примеси в рудных минералах, не раскрывается при дроблении и измельчении и селективно выделить его механическими способами обогащения практически невозможно.

Практически равномерная тонкая вкрапленность кварца и гидроксидов железа в марганцевых агрегатах не позволяет избавиться от них физическими методами обогащения. Характер взаимоотношения марганцевых фаз определяет невозможность селективного разделения конкретных марганцевых минералов [4].

Использование традиционной технологии обогащения ***малофосфористых, фосфористых маложелезистых, фосфористых железистых руд*** по схеме, включающей: предварительную классификацию, обесшламливание в гидроциклоне, электромагнитную и полиградиентную сепарацию, позволяет получать марганцевые концентраты, удовлетворяющие требованиям ТУ-149-157-78 на

оксидные концентраты II, III и IV сорта по содержанию Mn, $SiO_2$ и Fe и превышающие нормативные требования по содержанию фосфора. Получение марганцевых концентратов с необходимым отношением фосфора к марганцу предполагает использование химических методов их обесфосфоривания (доводки) и последующего окускования.

Установлено, что выбор химических способов обесфосфоривания концентратов (гаусманитовый, содовый) определяется минеральной формой фосфора, отношением железа к фосфору и содержанием кремнезема. Эффективность содового способа определяется отношением железа к фосфору в исходном концентрате: чем выше значение Fe/P, тем меньше степень обесфосфоривания. Также возможность применения содового способа обусловлена содержанием кремнезема в исходном концентрате: при низком его значении содовый способ неэффективен. Гаусманитовый способ обеспечивает обесфосфоривание на 60–80 %, содовый способ – на 74–80 % и обескремнивание на 65–68 % [5].

При нахождении фосфора в форме крандаллита возможно применение щелочного способа, позволяющего получить кондиционный по фосфору марганцевый концентрат (P/Mn=0,0044), степень обесфосфоривания составляет 67 %. Щелочной способ дает возможность исключить из технологической схемы высокотемпературный обжиг [5].

При обогащении руды всех четырех проб отмечается значительный выход промпродуктов, с которыми связаны основные потери марганца. Минералогическим анализом установлено, что в промпродуктах главным образом присутствует псиломелан, в подчиненном количестве встречается криптомелан. В промпродукте пробы С–4 накапливается значительное количество гетита в основном в виде агрегатов.

Промпродукты магнитного обогащения могут быть переработаны с использованием солянокислотного вскрытия или сульфатно-термохимическим способом, включающим следующие технологические операции: сульфатизацию, обжиг сульфатной массы и водное выщелачивание, с последующей очисткой растворов от фосфора и железа и дальнейшей переработкой очищенных растворов с получением высококачественного марганцевого концентрата (ВМК), химического диоксида марганца (ХДМ), кремниевого кека ($SiO_2$ – 80 %) и оксида никеля.

Немагнитные фракции с содержанием марганца 3,9–6,0 %, высоким содержанием кремнезема (70,0–90,5 %) и низким содержанием примесей железа и фосфора (0,78–3,49 и 0,07–0,31 %) можно отнести к отвальным хвостам. Фракции сформированы кварцем, который представлен преимущественно свободными зернами (обломками). В подчиненном количестве отмечаются бедные сростки кварца с гидроксидами железа и марганца. Фосфор в немагнитных фракциях присутствует в форме апатита, образующего тонкую вкрапленность в кварце. Немагнитные фракции могут представлять практический интерес как силикатные продукты для использования в строительных целях.

Несмотря на эффективность гидрометаллургических способов получения марганца из минерального сырья, им свойственен такой недостаток, как существенные капитальные затраты на строительство цеховых зданий, на аппараты и другое оборудование. Поэтому для переработки бедного марганецсодержащего сырья перспективны геотехнологические способы, в которых капитальные затраты сведены к минимуму, одним из которых является кучное выщелачивание (КВ). Морфоструктурные характеристики руд (естественная дезинтеграция материала, преобладание мелких и тонких классов крупности) в целом являются благоприятными для их химического обогащения, в том числе с использованием метода кучного выщелачивания.

С учетом валентного состояния марганца (Mn(IV) и Mn(III)) при выщелачивании руды раствором серной кислоты для перевода марганца в растворимую форму Mn(II) необходимо введение восстановителя. В качестве восстановителя используют железный купорос, травильные растворы, пероксид водорода, сульфидные промпродукты и концентраты, ферромарганец, а также газы – $SO_2$ и $SO_3$. Выбор восстановителя определяется рядом факторов, основным из которых, наряду с эффективностью протекания самого процесса, выступает экономический.

Показано, что все исследуемые пробы эффективно вскрываются без нагревания при использовании растворов серной кислоты с концентрацией 200–300 г/л и добавкой в качестве восстановителя пероксида водорода ($H_2O_2$) или железа сернокислого ($FeSO_4*7H_2O$). Степень извлечения марганца в раствор составляет 80–95 %.

Для моделирования процесса кучного выщелачивания были проведены экспериментальные исследования по вскрытию исходной ***окисленной фосфористой железистой марганцевой руды*** (21 % $Mn_{общ.}$, 9 % $Fe_{общ.}$, 42 % $SiO_2$, 1,2 $P_2O_5$) в перколяционных условиях, позволяющие уточнить технологические параметры процесса: степень извлечения марганца, кинетику процесса и расход реагентов, а также оценить принципиальную возможность применения этого метода для переработки такого типа руд. В продуктивный раствор извлечено, %: Mn – 95,0; Fe – 26,1; P – 24,7; Ni – 95,4; Zn – 93,3; Cu – 91,2; Co – 85,7. Состав полученного продуктивного раствора, г/л: Mn – 51,21; Fe – 3,67; P – 0,29; Ni – 0,62; Zn – 0,84; Cu – 0,13; Co – 0,03 [6].

При кислотном выщелачивании в раствор переходят попутные компоненты: железо, алюминий, кремний, кальций, магний, цветные металлы (медь, кобальт, никель и др.), являющиеся нежелательными примесями в процессах дальнейшей переработки. Очистку от фосфора и железа осуществляли путем осаждения фосфатов кальция и гидроксида железа с использованием извести (CaO). Для электролитических процессов раствор дополнительно очищали от ионов никеля сорбционным способом на аминокарбоксильном амфолите Purolite S-930. Десорбцию никеля с насыщенного сорбента проводили раствором серной кислоты с концентрацией 250–300 г/л. Из товарного элюата никель осаждали раствором едкого натра с концентрацией 200 г/л. Затем осадок промывали водой и прокаливали при температуре 360ºС. Содержание никеля в оксиде (NiO) составило 75 %. Сквозное извлечение никеля – 80,5 %.

Продуктивные растворы сульфата марганца с необходимой степенью очистки являются исходными для получения широкого ассортимента товарной марганцевой продукции. Сквозное извлечение марганца в товарную продукцию составляет 80–90 % [6].

Разработанные инновационные технологические решения по переработке труднообогатимых марганцевых руд соответствуют современным требованиям экологической безопасности, характеризуются высокими технологическими и экономическими показателями, позволяют получать широкий ассортимент товарной марганцевой продукции в соответствии со спросом и требованиями конкретных потребителей: высококачественный марганцевый концентрат (Mn – 60,0 %; Fe – 0,01 %; P – <0,005 %; S – 0,5 %) – перспективное сырье для производства высокосортных марганцевых сплавов; электролитический металлический марганец (Mn – 99,7 %) для металлургии; химический и электролитический диоксид марганца (Mn – 63 %) для производства химических источников тока.

Наиболее перспективными методами переработки смешанных силикатных (карбонатно-силикатных и силикатно-карбонатных) и окисленных фосфористых высокожелезистых марганцевых руд следует считать химико-технологические, которые могут применяться в сочетании с операциями механического обогащения или взамен их для получения качественных концентратов при переработке низкокачественных и труднообогатимых руд. В основе разработки технологических схем комплексной переработки труднообогатимого марганцевого сырья должно лежать детальное изучение вещественного состава, определяющего технологические свойства, что позволит получить объективную экономическую характеристику руд, концентратов и промпродуктов каждого конкретного месторождения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Марганцевые руды. М.: Росгеолфонд. 2011. 47 с.
2. *Ожогина Е.Г.* Технологическая минералогия марганцевых руд Сибири // В сб. научных статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии «Новые методы

технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2009. С. 28–32.
3. *Мартынова Т.А.* Особенности марганцевой минерализации в метаморфических комплексах пород // Разведка и охрана недр. 2011. № 12. С. 26–31.
4. *Якушина О.А., Сычева Н.А., Ожогина Е.Г.* Морфоструктурный анализ руд черных металлов методом рентгенотомографии // В сб. научных статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии «Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2009. С. 40–45.
5. *Пестонова Е.А., Ануфриева С.И., Ожогина Е.Г.* Обесфосфоривание концентратов обогащения окисленных марганцевых руд химическими способами // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». Черметинформация. 2011. Выпуск 7 (1339). С. 22–27.
6. *Соколова В.Н., Ануфриева С.И., Темнов А.В., Борзых О.С., Якушина О.А.* Перспективы применения технологии кучного выщелачивания для переработки труднообогатимых марганцевых руд // Разведка и охрана недр. 2011. № 8. С. 44–49.

## ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РОССЫПНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНО-ТИТАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

***Левченко Е.Н.***

ФГУП «ИМГРЭ», г. Москва, levchenko@imgre.ru

Прогнозная оценка технологических свойств и обогатимости песков является обязательным элементом технологических испытаний при проведении геологоразведочных работ. На основании результатов комплекса минералого-технологических исследований, в первую очередь, гравитационно-магнитного и минералогического анализов, прогнозируются предельно достижимые технологические показатели (номенклатура и качество концентратов, их выход, извлечение ценных компонентов, неизбежные потери в хвостах). При этом прогнозные показатели обосновываются фактическим материалом, отражающим особенности вещественного состава и технологических свойств изучаемого минерального сырья. Кроме того, на этапе прогнозной оценки технологических свойств и обогатимости песков производится выбор наиболее эффективного для обогащения конкретного минерального комплекса технологического оборудования и принципиальной технологической схемы, которая представляет собой наиболее целесообразную и эффективную последовательность и совокупность технологических операций. Результаты прогнозной оценки технологических свойств и обогатимости помогают технологу определить, в каком диапазоне качественно-количественных характеристик он может работать и к каким именно характеристикам следует стремиться [4].

Самостоятельную ценность представляет прогнозная оценка технологических свойств песков на ранних стадиях геологоразведочных работ, когда зачастую не специалист-технолог, а геолог принимает решение о целесообразности их продолжения.

В результате анализа и обобщения данных об особенностях вещественного состава титан-циркониевых объектов, полученных за период 2000–2010 г.г., выявлены минералогические факторы, влияющие на их технологические свойства при обогащении редкометалльных россыпей [3, 5, 7]. Проведенный анализ потерь полезных компонентов на различных стадиях технологического процесса и возможных причин несоответствия рудных концентратов стандартам

качества позволяет придти к следующему выводу: на оценку технологических свойств россыпей влияют 4 группы факторов вещественного состава россыпей: химический состав, гранулярный состав; минеральный состав; свойства минералов.

Критериями оценки технологических свойств, связанных с гранулярным составом являются: доля рудных минералов по самых крупных и мелких классах; форма зерен рудных минералов и степень их окатанности, степень сортированности песков.

Основные особенности минерального состава, влияющие на прогноз технологических свойств рудных песков, следующие: содержание рудных минералов, распределение полезных компонентов по минералам; наличие сростков рудных минералов с породообразующими, доля минералов, ухудшающих качество рудных концентратов, наличие попутных полезных минералов [2].

Выявленные особенности вещественного состава титан-циркониевых россыпей рекомендуются в качестве *критериев прогноза технологических свойств рудных песков на ранних стадиях ГРР* (рис. 1).

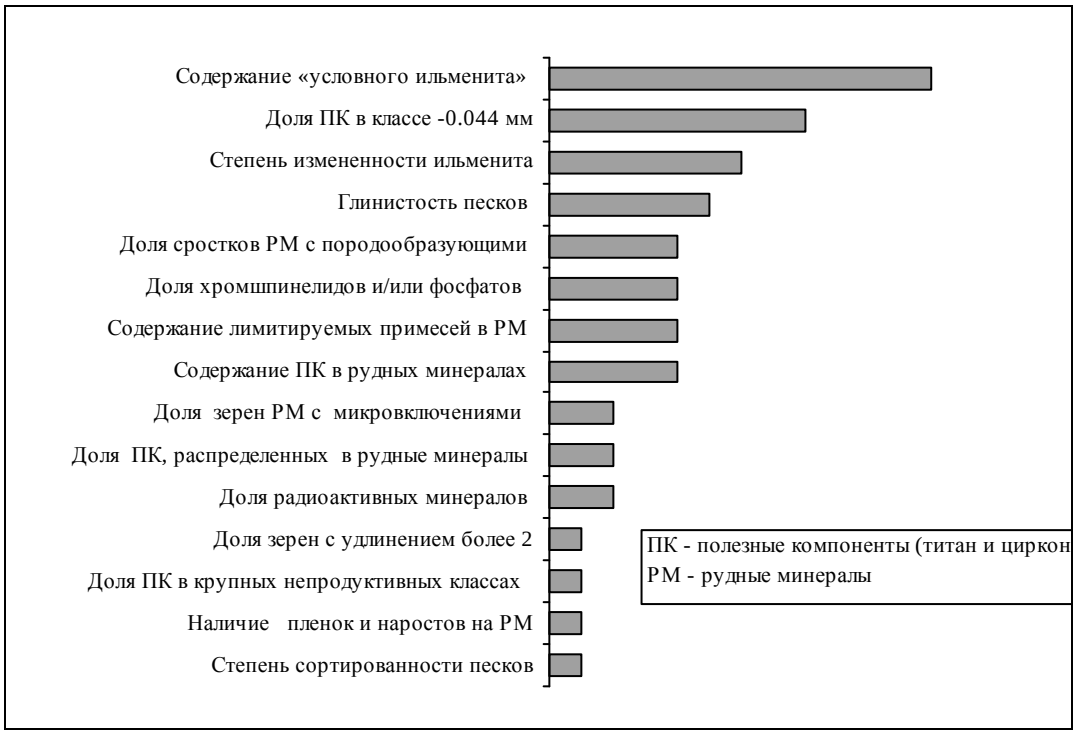



**Рис. 1. Ранжирование критериев оценки технологических свойств рудных песков**

1. *Качество товарных концентратов* определяется (в порядке значимости): высоким содержанием полезных компонентов ($TiO_2$ и $ZrO_2$) и низким – вредных примесей ($Cr_2O_3$, $P_2O_5$, $ThO_2$ и др.) в рудных минералах; низким содержанием в песках хромшпинелидов и фосфатов; отсутствием сростков рудных минералов с нерудными и микровключений зерен минералов с низким содержанием полезного компонента и (или) высоким содержанием вредного в рудных фазах, наличием пленок и наростов фосфатных и железистых минералов на поверхности рудных зерен.

2. *Степень извлечения полезных компонентов* определяется (в порядке значимости): минимальной долей рудных минералов в крупных и тонких классах песков, низкой степенью глинистости песков, максимальной долей полезных компонентов ($TiO_2$, $ZrO_2$) в рудных минералах, отсутствием сростков рудных минералов с нерудными, отсутствием микровключений фаз с другими физическими свойствами в рудных минералах, низкой степенью измененности ильменита, высокой степенью сортированности песков и хорошей окатанностью зерен рудных минералов; изометричностью зерен рудных минералов.

3. *Повышение технико-экономических показателей обогащения песков* определяется (в порядке значимости): высоким содержанием рудных минералов в песках, возможностью промышленного использования нерудных (пород вскрыши и хвостов первичного обогащения) и попутных полезных минералов.

Степень влияния каждого из вышеперечисленных критериев на сквозное извлечение полезных минералов в концентраты и их качество не всегда поддается отдельному учету. При этом отрицательное влияние одного фактора может быть компенсировано совокупным влиянием других факторов вещественного состава. Полученные данные могут служить для обоснования целесообразности дальнейшего изучения объекта, определения основных направлений создания оптимальной технологии обогащения на лабораторных и укрупнено–лабораторных пробах при дальнейших исследованиях.

## Прогнозная оценка технологических свойств редкометалльно-титановых песков на ранних стадиях геологоразведочных работ

Апробация разработанных критериев проведена при оценке технологических свойств Ti-Zr песков на пробах различных прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы: Семеновской (Тюменская обл.) – две малые технологические пробы (МТП), Салехардской – три МТП, Мансийской и Умытинской (ХМАО-Югры) – одна и три МТП соответственно [1, 7].

На основании результатов комплекса минералого-технологических исследований, в первую очередь, гравитационно-магнитного и минералогического анализов, выполнен прогноз предельно достижимых технологических показателей (номенклатура и качество концентратов, их выход, извлечение ценных компонентов, неизбежные потери в хвостах). При этом прогнозные показатели обоснованы фактическим материалом, отражающим особенности вещественного состава и технологических свойств изучаемого минерального сырья.

Рассмотрим эти факторы с точки зрения прогнозной оценки технологических свойств титан-циркониевых песков и количественно-качественных характеристик. Объектом-аналогом для исследуемых площадей является Ордынское месторождения.

Химический состав. Анализ содержания диоксидов ценных компонентов в пробах показал (табл. 1), что содержание диоксида титана составляет от 0,73% (проба 1) до 3,04% (проба 9), что соизмеримо с показателями по принятой в качестве аналога пробе ОР (Филипповский участок, Ордынское месторождение) – 1,22%, кроме пробы 4, где этот показатель равен 0,4%. Содержание диоксида циркония в пробах 1–6 составляет от 0,026% (проба 3) до 0,12% (проба 6), что намного меньше, чем в пробе ОР (0,26%) и свидетельствует о низком содержании циркона в пробах. В пробах Умытинской площади (7–9) эта величина сопоставима с объектом-аналогом.

Таблица 1. Содержания диоксида титана и циркония в пробах прогнозно-поисковых площадей, %

| | Семеновская | | Салехардская | | | Мансийская | Умытинская | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $TiO_2$ | 0.73 | 1.28 | 0.97 | 0.40 | 0.81 | 1.05 | 1.26 | 1.64 | 3.04 |
| $ZrO_2$ | 0.053 | 0.07 | 0.026 | 0.06 | 0.098 | 0.12 | 0.20 | 0.27 | 0.51 |

Гранулярный состав. Изучаемые пески представляют собой тонкозернистый, узко классифицированный материал и очень сильно различаются по гранулярным характеристикам (рис. 2). Пески различаются и по содержанию и распределению оксидов титана и циркония в класс –0,044 мм. В пробах 1–3, 5 выход класса менее 0,044 мм составляет от 30 до 80%, и, соответственно, выход продуктивных классов крайне низкий, что отрицательно скажется на технологические показатели их обогащения.

Седиментационный анализ материала класса крупности –0.044+0 мм проб и распределение ценных компонентов, как показателя неизбежных технологических потерь, показал (рис. 3), что в пробах 1, 3, 5 от материала этого класса 21,61, 47,11 и 24,45% соответственно имеет крупность менее 0,02 мм, а для пробы 2 эта величина и вовсе составляет 80,11%.

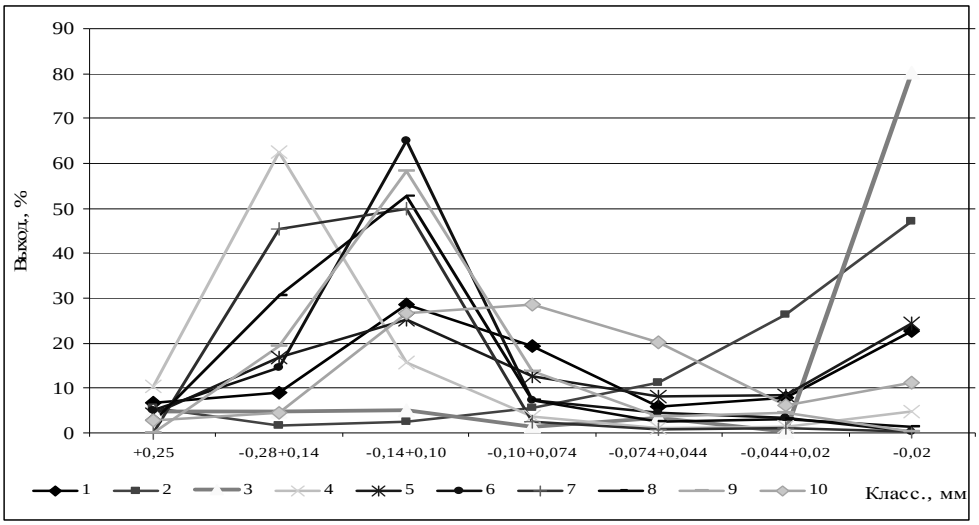



**Рис. 2. Характеристика гранулярного состава проб песков прогнозно-поисковых площадей: 1, 2 – Семеновская, 3–5 – Салехардская, 6 – Мансийская, 7–9 – Умытинская, 10 – Ордынское**

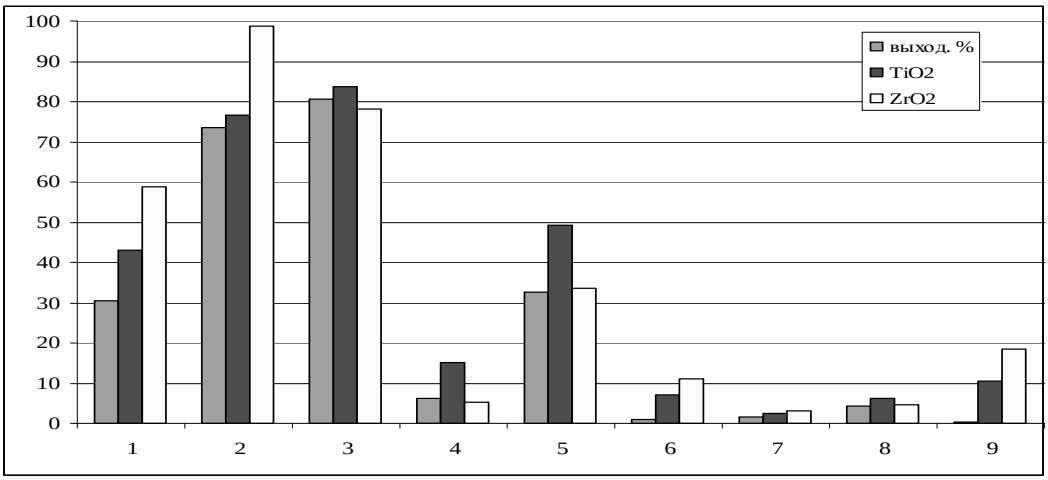



**Рис. 3. Неизбежные потери ценных компонентов со шламовой фракцией проб песков прогнозно-поисковых площадей: 1, 2 – Семеновская, 3–5 – Салехардская, 6 – Мансийская, 7–9 – Умытинская**

На основании данных о содержании ценных компонентов в исходных пробах, гранулярного состава и распределения диоксидов титана и циркония (титановых минералов и циркона), было рекомендовано прогнозно-поисковые плащади, охарактеризованные пробами 1, 2, 3 и 5, исключить из дальнейшего геологического доизучения, но для полноты картины обоснования критериев прогноза продолжены исследования по пробе 2 Семеновской площади. По Умытинской площади исследования продолжены по пробе 8, как наиболее представительной по среднему составу участку первоочередной отработки. Продуктивным для анализируемых проб песков Мансийской и Умытинской площадей является класс крупности –0.14+0.044 мм, выход которого составляет 70,01% от исходной массы песков для рудной пробы Мансийской площади и 62,45% – для Умытинской площадей при извлечении в 88,83% $TiO_2$ и 88,36% $ZrO_2$ и 88,2% $TiO_2$ и 94,72% $ZrO_2$ соответственно.

Минеральный состав. Для исследуемых проб определено содержание ценных рудных минералов, а также минералов – носителей вредных и лимитируемых примесей.

Анализ минерального состава исходных песков пробы Семеновской площади показал следующие: содержание ильменита – 2,1%, рутила – 0.07%, циркона – 0,21%. Однако, данные по содержанию рудных минералов в зернистой части проб песков показывают, что в классах крупности более 0,044 мм циркона содержится всего 1,8%, а титансодержащих минералов 0,8% от общего количества при содержании ильменита – 0,02%, рутила – 0.01%, циркона – 0,01%.

В пробе Салехардской площади содержание ильменита – 0,66%, рутила – 0.04%, циркона – 0,13%. В классах –0,28+0,14 и –0,14+0,1 мм содержание титановых минералов составляет 0,06 и 0,42 %, а циркона – 0,01 и 0,06 % соответственно, в классах –0,1+0,074 и –0,074+0,044 мм содержание титановых минералов составляет 0,19 и 0,06 %, а циркона – 0,05 и 0,01 % на продуктивный класс соответственно, в материал менее 0,044 мм распределилось 4,13 % ильменита, 5,95% лейкоксена, 3,01% рутила, 4,26% сфена и 4,56% циркона.

Существенное значение для обогатительного передела имеет также *степень сортированности песков*, поскольку концентрация рудных минералов в узких классах позволяет применять более компактные технологические схемы и избегать лишних потерь в многочисленных классах. В данном конкретном случае материал рудных проб хорошо сортирован, но все зерна рудных минералов Семеновской и Салехардской площадей имеют, в основном, размер 0,074 – 0,02 мм с преобладанием крупности 0,02 мм. Содержание рудных минералов в пробе песков Мансийской площади составляет 2,38%, в т.ч.: 1,85 % ильменита, 0,15% лейкоксена, 0,16% рутила, 0,02% сфена и анатаза, цирконовых– 0,35%.

Содержание рудных минералов в изученной пробе песков Умытинской площади составляет 3,0%, в т.ч.: 2,32 % ильменита, 0,1% лейкоксена, 0,16% рутила, 0,01% сфена, цирконовых– 0,41%. В продуктивном классе пробы на долю титановых минералов приходится 2,74%, в т.ч.: 2,45 % ильменита, 0,10% лейкоксена, 0,17% рутила, 0,01% сфена и анатаза, а цирконовых – 0,39 %. В пробе содержится 0,05% минералов гр. хромшпинелидов и 0,11% граната. Содержание монацита в пробе составляет 0,001% со 100% распределением в класс –0,1+0,044 мм. Минералы группы эпидота содержатся в пределах десятых долей процента (0.07%). Остальные породообразующие минералы находятся в подчиненном количестве.

Результаты гравитационно-магнитного анализа узких классов крупности песков, позволяющие прогнозировать технологические показатели первичного обогащения (выход коллективного концентрата, содержание рудных минералов в продуктах и их извлечение), поскольку: в *тяжелую фракцию плотностью >2.88 г/см$^3$* концентрируются все основные промышленно-ценные минералы, (ильменит, рутил, лейкоксен, циркон), имеющие плотность >3.6 г/см$^3$, а также минералы с промежуточной плотностью 2.88–3.6 г/см$^3$ (гранат, кианит, группа эпидота, гидроксиды железа, магнетит и его сростки с породообразующими минералами, роговая обманка и т.д.). Все эти минералы при гравитационном обогащении будут выделены в черновой концентрат. В легкую фракцию песков (хвосты гравитации) будут выделены кварц, полевой шпат и прочие нерудные минералы *плотностью <2.88* г/см$^3$. Анализ полученных данных показал (табл. 2), что для пробы Семеновской площади суммарный выход тяжелой фракции (черновой концентрат) составляет 0,1% от исходной пробы, а легких фракций – 31,99%. Для всех остальных проб выход тяжелой фракции соответствует содержанию в них рудных минералов. Высокая эффективность разделения материала всех продуктивных классов крупности песков по плотности 2.9 г/см$^3$ указывает на *отсутствие сростков* рудных и породообразующих минералов и позволяет рекомендовать для первичного обогащения песков гравитацию.

Результаты магнитного фракционирования материала плотностью $\geq\rho$ –2,9 г/см$^3$ фракции классов крупности технологических проб и их минералогический анализ, позволяют прогнозировать технологические показатели доводки коллективного концентрата (табл. 3).

Анализ результатов магнитного фракционирования проб (таб. 4) показал, что, выход фракций в пробе песков Семеновской площади весьма низкий и составляет сотые доли процентов. Учитывая все вышеперечисленные особенности объекта, следует ожидать, что получить кондиционные концентраты

будет проблематично; выход фракций в пробе песков Салехардской площади составляет десятые доли процентов и выход рудных концентратов незначительным. Результаты магнитно-гравитационного анализа использованы для прогнозной оценки обогатимости проб песков по основным рудным минералам и диоксидам на стадии получения коллективного концентрата. Оценка проводилась по варианту технологической схемы с выделением чернового концентрата максимально возможного качества из материала классов крупнее 0,044 мм и учтено возможное доизвлечение рудных минералов из кл.–0,044 мм. Установлено, что титановые минералы могут быть выделены в черновой концентрат на 93–97%, а циркон на 75–97% от исходных песков (за исключением песков Семеновской площади, где циркон на 52% потерян в хвостах гравитации). Основные потери рудных минералов в хвостах гравитации и шламах связаны с их тонкозернистой частью.

Таблица 2 . Результаты фракционирования по плотности материала продуктивных классов крупности проб песков прогнозных площадей (ρ –2,91 г/см$^3$)

| Объект (площадь) | Выход фракции от исходной пробы, % | |
|---|---|---|
| | ≥ρ –2,9 г/см$^3$ | ≤ ρ –2,9 г/см$^3$ |
| Семеновская | 0,1 | 31,99 |
| Салехардская | 1,961 | 91,403 |
| Мансийская | 2.384 | 89.186 |
| Умытинская | 3,25 | 89,89 |

Таблица 3. Результаты магнитного фракционирования материала плотностью ≥ρ –2,9 г/см$^3$ фракции классов крупности технологических проб

| Класс крупности, мм (площадь) | Выход фракции, % | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | от класса | | | | | от исходной пробы | | | | |
| | Mgt | I | II | III | IY | Mgt | I | II | III | IY |
| ***Семеновская*** | | | | | | | | | | |
| –0,315+0,2 | | 9,09 | 72,73 | 18,18 | | | 0,001 | 0,010 | 0,003 | |
| –0,2+0,15 | | 18,18 | 72,73 | 9,09 | | | 0,002 | 0,007 | 0,011 | |
| –0,15+0,1 | | 28 | 68 | 4,00 | | | 0,007 | 0,016 | 0,002 | |
| –0,1+0,063 | | 46,15 | 38,46 | 15,39 | | | 0,013 | 0,011 | 0,004 | |
| –0,063+0,044 | | | | | | | | | | |
| Итого :фракция | | | | | | | **0,0232** | **0,045** | **0,0178** | |
| ***Салехардская*** | | | | | | | | | | |
| –0,56+0,28 | 0,04 | 0,22 | | | | 0,004 | 0,020 | | | |
| –0.28+0.14 | 0,009 | 0,27 | 0,28 | 0,17 | | 0,005 | 0,171 | 0,175 | 0,105 | |
| –0.14+0.1 | 0,05 | 0,10 | 2,48 | 1,89 | 0,27 | 0,008 | 0,016 | 0,389 | 0,297 | 0,042 |
| –0.1+0.074 | 0,26 | 6,06 | 4,22 | 0,28 | | 0,010 | 0,229 | 0,160 | 0,011 | |
| –0.074+0.044 | 0,21 | 3,64 | 1,75 | 0,36 | | 0,003 | 0,046 | 0,022 | 0,005 | |
| Итого: фракция | | | | | | **0,029** | **0,482** | **0,746** | **0,418** | **0,042** |
| ***Мансийская*** | | | | | | | | | | |
| –0.28+0.14 | 0 | 32.69 | 57.69 | 9.62 | 0.000 | 0.3174 | 0.5601 | 0.0934 | 0 | 32.69 |
| –0.14+0.1 | 0.26 | 65.61 | 7.67 | 26.46 | 0.002 | 0.3839 | 0.0449 | 0.1548 | 0.26 | 65.61 |
| –0.1+0.074 | 0.16 | 71.73 | 2.95 | 25.16 | 0.001 | 0.5865 | 0.0241 | 0.2057 | 0.16 | 71.73 |
| –0.074+0.044 | 0 | 32.69 | 57.69 | 9.62 | 0.003 | 1.2878 | 0.6291 | 0.4539 | 0 | 32.69 |
| Итого:фракция | | | | | | **0.003** | **1.2878** | **0.6291** | **0.4539** | **0,042** |
| ***Умытинская*** | | | | | | | | | | |
| –0.28+0.14 | 0 | 28.57 | 28.57 | 38.1 | 4.76 | 0. | 0.011 | 0.011 | 0.014 | 0.002 |
| –0.14+0.1 | 0.37 | 63.20 | 14.13 | 13.38 | 8.92 | 0.003 | 0.581 | 0.130 | 0.123 | 0.082 |
| –0.1+0.074 | 0.53 | 76.40 | 7.30 | 6.35 | 9.42 | 0.008 | 1.137 | 0.109 | 0.094 | 0.140 |
| –0.074+0.044 | 0.42 | 69.82 | 6.04 | 9.36 | 14.36 | 0.003 | 0.563 | 0.049 | 0.076 | 0.116 |
| Итого:фракция | | | | | | **0.015** | **2.281** | **0.287** | **0.293** | **0.340** |

Таблица 4. Прогнозные технологические показатели первичного обогащения проб исходных песков

| Продукты | Выход от исх.,% | Содержание, % | | | | Извлечение, % | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Тит. мин. | $TiO_2$ | циркон | $ZrO_2$ | Тит. мин. | $TiO_2$ | циркон | $ZrO_2$ |
| **Семеновская площадь** | | | | | | | | | |
| **Черновой к -т** | **12,74** | **21,17** | **9,56** | **2,49** | **1,79** | **97,54** | **95,12** | **48,05** | **48,02** |
| ∑ хвосты | 85,26 | 0,1 | **0,06** | 0,11 | **0,045** | **2,46** | **4,88** | **51,95** | **51,98** |
| Исх.пески | 100,00 | **2,13** | **1,28** | **0,207** | **0,074** | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| **Салехардская площадь** | | | | | | | | | |
| **Черновой к -т** | **9,6** | **6,68** | **3,89** | **1,51** | **0,91** | **93,41** | **93,23** | **96,98** | **96,99** |
| ∑ хвосты | 90,4 | 0,05 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | **6,59** | **6,77** | **3,02** | **3,01** |
| Исх.пески | 100 | 0,66 | 0,4 | 0,122 | 0,06 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| **Мансийская площадь** | | | | | | | | | |
| **Черновой к -т** | **2,69** | **70,09** | **40,51** | **9,95** | **6,27** | **95,1** | **95,1** | **75,37** | **75,36** |
| ∑ хвосты | 97.31 | 0.1 | **0.06** | 0.09 | **0.06** | **4.90** | **4.90** | **24.63** | **24.63** |
| Исх. пески | 100.00 | **2.173** | **1.12** | **0.351** | **0.23** | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100,00 |
| **Умытинская площадь** | | | | | | | | | |
| **Черновой к -т** | **11,82** | **39,93** | **22,57** | **5,60** | **3,69** | **96,85** | **96,85** | **87,34** | **87,31** |
| ∑ хвосты | 88,18 | 0,17 | 0,09 | 0,10 | 0,06 | 3,15 | 3,15 | 12,67 | 12,69 |
| Исх.пески | 100,00 | 3,78 | 1,87 | 0,51 | 0,34 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Расчет прогнозных технологических показателей при получении конечных рудных концентратов (табл. 5) показал, что при доводке коллективного концентрата пробы Семеновской площади, получен только ильменитовый концентрат, содержащий 97–98 % ильменита (51,54% $TiO_2$) с извлечением 30,62% $TiO_2$ при выходе 0,45% от исходных песков. Потери ильменита в процессе доводки связаны с тонкозернистой его частью (менее 0,03 мм), которые не извлекаются на существующих аппаратах. Циркон в пробе не удалось сконцентрировать в концентрат ни по одному из вариантов, поскольку он распределся почти равномерно по продуктам доводки.

При обогащении рудных песков пробы Салехардской площади могут быть получены титановые концентраты (ильменитовый и рутиловый), соответствующие требованиям ГОСТов и цирконовый концентрат с высоким извлечением от исходных песков. Однако, выход товарной продукции, в связи с низким содержанием рудных минералов в исходных песках, мал, что отрицательно повлияет на экономические показатели освоения объекта.

Таким образом, освоение представленных Семеновской и Салехардской площадей как титан-циркониевых экономически не целесообразно. При постановке соответствующих работ и проведении дополнительных исследований этот объект может рассматриваться как кварцевые пески с попутным извлечением редкометалльных концентратов.

При обогащении рудных песков пробы Мансийской площади могут быть получены титановые концентраты (ильменитовый и рутиловый), соответствующие требованиям ГОСТов с высоким извлечением от исходных песков. Общее извлечение $TiO_2$ от рудных песков составляет более 94,87%. В цирконовый концентрат извлекается всего 71,28 % $ZrO_2$ от исходной пробы. Более 25% $ZrO_2$ остается в продуктах обогащения. Цирконовый концентрат получать, очевидно, будет не рентабельно в связи с повышенным содержанием его в шламовой фракции и большими потерями с продуктами обогащения.

Прогноз технологических показателей переработки рудных песков Умытинской площади показал, что будут получены все рудные концентраты с высокими технологическими параметрами. Конечный **ильменитовый концентрат** при выходе 2,79% от исходных песков содержит 54,3%$TiO_2$ (0,11% $ZrO_2$, 0,045% $Cr_2O_3$, 0,05 $P_2O_5$%, 0,12 $SO_3$%, 1,1% $SiO_2$) с извлечением 76,59% $TiO_2$ от рудных песков. Извлечение ильменита в одноименный концентрат 92,58%. **Рутиловый концентрат** при выходе 0,22% от исходных песков содержит 95,1% $TiO_2$ и 0,17% $ZrO_2$ с извлечением 10,58% $TiO_2$ от рудных песков. Извлечение рутила в одноименный концентрат 79,48%. В **цирконовый**

**концентрат** извлекается 77,27% $ZrO_2$ от исходной пробы. Содержание **$ZrO_2$** в концентрате – **65,1%,** выход 0,4% от исходного материала. Содержание урана и тория в цирконовом концентрате составляет 0,085 экв.% Th, что не превышает требований ОСТ-48-82-81 (0,1 экв.% Th) и требований НРБ-2000. Извлечение циркона в одноименный концентрат 84,68%.

Таблица5. Прогнозные технологические показатели обогащения редкометалльно-титановых песков прогнозно-поисковых площадей

| Наименование продукта, объекты | Выход, % | Содержание, % | | Извлечение, % | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $TiO_2$ | $ZrO_2$ | $TiO_2$ | $ZrO_2$ |
| **Салехардская площадь** | | | | | |
| Ильменитовый концентрат | 0,58 | 57,0 | 0,15 | 79,62 | 1,19 |
| Рутиловый концентрат | 0,04 | 95,0 | 0,5 | 9,39 | 0,27 |
| Цирконовый концентрат | 0,1 | 0,1 | 65,1 | 0,02 | 84,77 |
| Пр.прод.1 | 1,25 | 0,15 | 0,05 | 1,31 | 2,37 |
| Пр.прод.2 | 2,26 | 0,15 | 0,07 | 1,56 | 4,73 |
| ∑ хвосты доводки | 5,37 | 0,1 | 0,05 | 1,33 | 3,66 |
| ∑ хвосты первичные | 90,4 | 0,03 | 0,003 | 6,77 | 3,01 |
| Исходные пески | 100,00 | 0,4 | 0,063 | 100,00 | 100,00 |
| **Мансийская площадь** | | | | | |
| Ильменитовый к-т | 1.78 | 54.2 | 0.12 | 84.49 | 0.67 |
| Рутиловый к-т | 0.12 | 94.1 | 0.15 | 10.38 | 0.06 |
| Цирконовый к-т | 0.35 | 0.15 | 64.5 | 0.05 | 71.28 |
| ∑ хвосты доводки | 1.01 | 0.56 | 3.03 | 0.52 | 9.66 |
| ∑ хвосты первичные | 96.74 | 0.06 | 0.06 | 4.90 | 18.33 |
| Исходные пески | 100.00 | **1,12** | **0.23** | 100,00 | 100,00 |
| **Умытинская площадь** | | | | | |
| Ильменитовый к-т | 2,79 | 54,30 | 0,11 | 76,59 | 0,91 |
| Рутиловый к-т | 0,22 | 95,10 | 0,17 | 10.58 | 0.11 |
| Цирконовый к-т | 0,40 | 0,39 | 65,10 | 0.08 | 77,27 |
| ∑ хвосты доводки | 8,41 | 2,03 | 0,58 | 8,63 | 14,47 |
| ∑ хвосты первичные | 67,82 | 0,09 | 0,03 | 3,09 | 6,04 |
| Галя (+0,14 мм) | 20,36 | 0,10 | 0,02 | 1,03 | 1,21 |
| Итого (расчетно) | 100,00 | **1,98** | **0,33** | 100,00 | 100,00 |

Таблица 6. Содержания полезных компонентов в рудных минералах для раличных площадей, %

| Полезный компонент | Требования стандарта для различных марок, (%) | | | Семеновская | Салехардская | Мансийская | Унечская | Ордынское |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $TiO_2$ в ИК | 54–57 | 52–62 | н/м 63,2 | **51,54** | **54,2** | **54,2** | **54,3** | **47,3** |
| $TiO_2$ в ильмените | | | | 60,77 | 49,994 | 51,86 | 56,2 | 55,47 |
| $TiO_2$ в РК | н/м 94 | | | – | **95,1** | 94,1 | **95,1** | 95,1 |
| $TiO_2$ в рутиле | | | | 98,75 | **98,35** | **99,04** | 98,7 | 98,22 |
| $ZrO_2$ в ЦК | н/м 65 | | н/м 60 | – | 64,1 | 64,5 | **65,1** | **62,7** |
| $ZrO_2$ в цирконе | | | | 65,78 | 65,3 | **65,97** | 65,73 | 66,22 |

Затушевано – несоответствие требованиям ко всем маркам, выделено несоответствие требованиям к отдельным маркам., ИК – ильменитовый концентрат, РК – рутиловый, ЦК – цирконовый.

*Содержание оксидов титана и циркония в рудных минералах* в значительной степени определяет их содержание в товарных концентратах, которое регламентируется требованиями стандартов качества (табл. 6). Содержание $TiO_2$ в ильменитовом концентрате нередко выше, чем в минерале, за счет присутствия в нем лейкоксена. В наибольшем количестве лейкоксен присутствует в песках Салехардской площади, что способствует повышению содержания $TiO_2$ в ильменитовом концентрате. Примесь лейкоксена в рутиловом концентрате, наоборот, может понизить содержание $TiO_2$, сделав его ниже нормы даже при высоком содержании $TiO_2$ в рутиле.

Таблица 7. Критерии оценки технологических свойств редкометалльно-титановых песков прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы

| Фактор вещественного состава | Пределы значений | **Эталонный объект** | Оцениваемый объект (стадия ППР) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Химический состав рудных песков** | | Ордынское Месторож-дение | Салехард-ская площадь | Умытин-ская площадь | Мансийская площадь | Семеновский участок |
| содержание $TiO_2$ / $ZrO_2$ % | ∑ н/м 1,5 | 1,22 / 0,26 | 0,40 / 0,06 | 1,95 / 0,33 | 1,12 / 0,23 | 0,73 / 0,053 |
| содержание $Cr_2O_3$ / $P_2O_5$ % | н/б 0,1/0,8 | 0,031 / 0,05 | 0,039 / 0,01 | 0,1 / 0,02 | 0,04 / 0,01 | 0,041 / 0,043 |
| **Гранулярный состав рудных песков и РМ** | | | | | | |
| продуктивный класс песков (более 80% РМ) | > 0,044мм | 0,1–0,044 | 0,28–0,02 | 0,14–0,02 | 0,14–0,02 | 0,06–0,02 |
| глинистость, % | 3–5 | 17,48 | **6,17** | **3,54** | 3,48 | 30,42 |
| степень сортированности (количество классов крупности, концентрирующих более 80% ПК) | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| доля ПК в крупных непродуктивных классах, % $TiO_2$ / $ZrO_2$ | 1,5 / 0,5 | 1,27 / 0,3 | 1,79 / 0,98 | 5,21 / 1,08 | 3,94 / 0,71 | 2,57 / 0,25 |
| доля ПК в классе –0.044 мм, % $TiO_2$ / $ZrO_2$ | 5,0/5,0 | 9,81 / 8,56 | 15,13 / 5,1 | 6,43 / 8,72 | 7,23 / 10,94 | 43,11 / 58,92 |
| **Минеральный состав рудных песков** | | | | | | |
| содержание «условного ильменита», кг/м$^3$ | 80 | 79,6 | 48,7 | 87,66 | 42,2 | 43,8 |
| доля ПК, распределенных в рудные минералы, % $TiO_2$ / $ZrO_2$ | н/м 80/90 | 83,98/ 91,6 | 85,46 / 93,85 | 92,33 / 92,34 | 96,84 / 95,3 | 79,0 / 88,1 |
| доля сростков рудных минералов с породообразующими, % | | – | – | – | – | – |
| доля хромшпинелидов , % | н/б 0,1 | 0,004 | 0,025 | 0,046 | 0,058 | 0,009 |
| доля фосфатов, % | н/б 0,2 | 0,18 | 0,011 | 0,03 | 1,013 | 0,441 |
| доля радиоактивных минералов, % монацит/циркон$_{метамик.}$ | н/б 0,1 | – / 0,01 | 0,001 / зн | 0,001 / 0,007 | 0,01 / зн | 0,001 / зн |
| **Особенности свойств минералов** | | | | | | |
| содержание $TiO_2$ в ильмените / рутиле, % | 52/94 | 50,14 / 97,64 | 49,99 / 98,35 | 56,2 / 98,7 | 51,86 / 99,04 | 60,77 / 98,95 |
| содержание $ZrO_2$ в цирконе, % | 60 | 65,78 | 65,3 | 65,73 | 66,03 | 65,78 |
| степень измененности ильменита, % | | 5 | 5 | 8 | 8 | 59,46 |
| доля зерен РМ с микровключениями | н/б 20 | – | – | – | – | – |
| наличие пленок и наростов на поверхности зерен | | – | – | – | – | – |
| **Извлечение в концентраты, % $TiO_2$ / $ZrO_2$** | н/м 86 | 86,0 / 88,13 | 89,01 / 84,77 | 87,83 / 81,66 | 91,87 / 71,28 | 30,62 / – |

В табл. 7 приведены критерии оценки технологических свойств для проб титан-циркониевых песков прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы (участка «Салехардская площадь», Умытинская и Мансийской площади (ХМАО) и Семеновского участка (Тюменская обл.) в сравнении с объектом-аналогом – Ордынским месторождением, показатели которого прошли утверждение в ФГУ ГКЗ.

В результате установлено, что по совокупности всех оцениваемых технологических параметров наиболее перспективным является Умытинский участок ХМАО-Югры, Мансийский

участок имеет несколько худшие характеристики вещественного состава по сравнению с Ордынским месторождением, главным образом, из-за более низкого содержания диоксидов титана и циркония в рудных песках и более высокой доли циркона в шламовом классе. Однако, фактор достаточно высокого суммарного содержания рудных минералов компенсирует вышеназванную негативную характеристику вещественного состава, что в итоге позволяет рассматривать Мансийский участок как перспективный для дальнейшего изучения. Семеновский участок и Салехардская площадь признаны бесперспективными, поскольку при меньшей глинистости и более низком содержании вредных примесей, он характеризуется низким содержанием титановых минералов (0,73 и 0,4%) и циркона (0,053 и 0,06%).

Апробация критериев оценки технологических свойств для проб титан-циркониевых песков прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы показала, что разработанные критерии могут успешно использоваться на ранних стадиях геологоразведочных работ. Полученные данные могут служить для обоснования целесообразности дальнейшего изучения данного объекта, определения основных направлений создания оптимальной технологии обогащения при дальнейших исследованиях.

## Прогнозная оценка технологических свойств редкометалльно-титановых песков на стадии поисково-оценочных работ

На стадии поисково-оценочных работ возникает необходимость в проведении геолого-технологического картирования (ГТК), которое осуществляется обычно на специально отбираемых малообъемных технологических пробах (МТП) с целью выделения и геометризации в объеме месторождения технологических типов и сортов руд. В сочетании с традиционным испытанием представительных технологических, проб, оно составляет основу современной технологической оценки запасов твердых полезных ископаемых.

Специфика геолого-технологического картирования (ГТК) титано-циркониевых россыпных месторождений, в первую очередь, заключается в отличии методики подсчета запасов данного вида минерального сырья от подсчета запасов руд коренных месторождений. [6, 7]. Для россыпных месторождений учитываются запасы извлекаемых (обычно на основе гравитационных технологий) основных промышленных минералов – ильменита, рутила и циркона. Сравнимость извлекаемой продуктивности по этим трем минералам достигается расчетом содержания извлекаемого условного ильменита $Ilm_{усл}$ = Ilm 5Ru+5Zr по фактическим содержаниям соответствующих извлекаемых минералов.

Для целей ГТК содержание извлекаемых рудных минералов может производиться двумя способами: и использованием количественного (реже, при соответствующем обосновании, полуколичественного) минералогического анализа и прямым технологическим экспериментом. В первом случае число проб массой в несколько килограммов может достигать первых сотен; во втором – каждая малая технологическая проба массой порядка первых десятков килограммов обогащается по полной гравитационно-магнитно-электрической схеме с получением ильменитового (тяжелая магнитная фракция), рутилового (тяжелая немагнитная проводящая фракция) и цирконового (тяжелая немагнитная непроводящая фракция) концентратов. Такие исследования требуют значительных затрат труда и времени и применяются при ГТК на сравнительно небольшом числе проб – обычно первые десятки. В обоих случаях в тяжелых немагнитных непроводящих (рутиловых) фракциях целесообразно определять наличие благородных и МПГ.

Результаты изучения минерального состава и определения извлекаемого количества промышленных минералов подвергаются статистической обработке: определение изменчивости каждого параметра и критерия качества вещественного состава и технологических свойств опробованных рудных песков (коэффициенты вариации); определение парных взаимосвязей (коэффициентов парной корреляции) всех определенных значений параметров и критериев вещественного состава и технологических свойств, геологических характеристик объекта и выбор наиболее существенных и характерных; проведение работ по графо-аналитической оценке наиболее

характерных выявленных зависимостей (графики, уравнения множественной регрессии и др.); выявление наличия на месторождении технологических типов и сортов руд, соотнесение их с геологической основой – геометризацией в объеме месторождения.

Применяемая развернутая схема гравитационно-магнитного фракционирования проб песков является традиционной при изучении вещественного состава рудных песков, поэтому результаты минералогического анализа по основным рудным минералам характеризуют технологические свойства рудных песков. В случае принципиальной идентичности разработанной для данного объекта технологии обогащения и фракционирования проб перед минералогическим анализом, результаты количественного определения рудных минералов считаются тождественными оптимальным показателям обогащения. Комплексность использования сырья оценивается по критерию «условный ильменит» (сумма содержания ильменита и содержаний рутила и циркона с учетом коэффициентов пересчета). Определяется изменчивость параметров вещественного состава и технологических показателей (содержаний минералов) и их взаимосвязь (коэффициенты вариации и парной корреляции), при этом при характеристике неравномерности вещественного состава и технологических свойств коэффициент вариации не учитывает расположение проб в пространстве. Изменчивость параметров вещественного состава и технологических свойств исследовавшихся проб, выраженная в процентах, оценивалась по коэффициенту вариации.

Исследование проведено на основе фактического материала, полученного при научно-методическом сопровождении поисково-оценочных работ на месторождении Центральное, по керновым пробам из 99 разведочных скважин трех рудных пересечений. В статистической обработке использованы следующие материалы: данные гравитационно-магнитного анализа исходных проб и тяжелой фракции; результаты оптико-минералогического анализа исходных проб разведочных скважин по основным рудным минералам – ильмениту, рутилу, циркону и «условному» ильмениту.

Таблица 8. Средние значения и изменчивость данных гравитационно-магнитного обогащения исходных проб,%

| | Выход от исходной массы | | | Перечистка серого шлиха | | | | Магнитное разделение черного шлиха | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | +0,56 мм | Серый шлих | Легкая фр. | Черный шлих | | Легкая фр. | | I | | II | | III | | н/магн |
| | | | | от серого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | от черн. шлиха | от исх. | от чер. шлиха | от исх. | от черн. шлиха | от исх. | от исх. |
| Среднее значение | 3,55 | 9,59 | 86,9 | 21,91 | 2,0 | 77,46 | 7,47 | 17,79 | 0,44 | 6,78 | 0,17 | 9,49 | 0,23 | 1,15 |
| Коэффициент вариации | 141,6 | 32,2 | 7,03 | 52,18 | 52,8 | 16,47 | 42,2 | 74,91 | 105,56 | 110,50 | 140,26 | 112,23 | 130,77 | 75,52 |

*Гравитационно-магнитное фракционирование исходных проб***.** Проанализированы данные по выходам массы продуктов гравитационно-магнитного обогащения (фракционирования) исходных проб (769 проб), проведенного по стандартной схеме подготовки проб к минералогическому анализу. Результаты статистического анализа всего имевшегося объема информации и суммарные показатели (табл. 8 и 9) показали, что среднее значение содержания непродуктивного класса +0,56мм невелико и составляет по месторождению 3,55% при очень большой вариации, составляющей более 140%. Столь большой разброс значений содержаний непродуктивного крупного класса объясняется тем обстоятельством, что в основном в верхних горизонтах его количество достигает первые десятки процентов. Указанное обстоятельство может быть учтено в процессе промышленной отработки месторождения при возможной локализации блоков с повышенным содержанием данного класса (учет повышенного расхода сеток грохотов, неизбежное уменьшение количества продуктивных классов, следовательно, и выхода товарных концентратов).

Таблица 9. Взаимосвязь данных гравитационно-магнитного обогащения исходных проб, %

| | Выход от исходной массы | | | Перечистка серого шлиха | | | | Магнитное разделение черного шлиха | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Черный шлих | | Легкая фракция | | I | | II | | III | | |
| | +0,56 мм | Серый шлих | Легкая фракция | от сер.шл. | от исх. | от сер.шл. | от исх. | от сер.шл. | от исх. | от чер.шл. | от исх. | от чер.шл. | от исх. | н/магн от исх. |
| | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | Q |
| C | 1.00 | 0.07 | –0.86 | –0.20 | –0.18 | 0.14 | 0.11 | –0.17 | –0.23 | –0.16 | –0.17 | –0.04 | –0.10 | –0.01 |
| D | 0.07 | 1.00 | –0.57 | –0.32 | 0.07 | 0.25 | 0.91 | 0.12 | 0.15 | 0.32 | 0.30 | 0.32 | 0.29 | –0.18 |
| E | –0.86 | –0.57 | 1.00 | 0.33 | 0.11 | –0.24 | –0.56 | 0.09 | 0.12 | –0.03 | –0.01 | –0.13 | –0.07 | 0.10 |
| F | –0.20 | –0.32 | 0.33 | 1.00 | 0.88 | –0.83 | –0.56 | 0.52 | 0.37 | 0.26 | 0.41 | 0.22 | 0.42 | 0.60 |
| G | –0.18 | 0.07 | 0.11 | 0.88 | 1.00 | –0.73 | –0.24 | 0.63 | 0.53 | 0.46 | 0.65 | 0.39 | 0.65 | 0.52 |
| H | 0.14 | 0.25 | –0.24 | –0.83 | –0.73 | 1.00 | 0.60 | –0.42 | –0.29 | –0.20 | –0.34 | –0.16 | –0.35 | –0.51 |
| I | 0.11 | 0.91 | –0.56 | –0.56 | –0.24 | 0.60 | 1.00 | –0.08 | –0.02 | 0.17 | 0.09 | 0.19 | 0.08 | –0.33 |
| J | –0.17 | 0.12 | 0.09 | 0.52 | 0.63 | –0.42 | –0.08 | 1.00 | 0.76 | 0.88 | 0.80 | 0.86 | 0.85 | –0.17 |
| K | –0.23 | 0.15 | 0.12 | 0.37 | 0.53 | –0.29 | –0.02 | 0.76 | 1.00 | 0.70 | 0.80 | 0.62 | 0.79 | –0.39 |
| L | –0.16 | 0.32 | –0.03 | 0.26 | 0.46 | –0.20 | 0.17 | 0.88 | 0.70 | 1.00 | 0.88 | 0.92 | 0.86 | –0.37 |
| M | –0.17 | 0.30 | –0.01 | 0.41 | 0.65 | –0.34 | 0.09 | 0.80 | 0.80 | 0.88 | 1.00 | 0.75 | 0.94 | –0.25 |
| N | –0.04 | 0.32 | –0.13 | 0.22 | 0.39 | –0.16 | 0.19 | 0.86 | 0.62 | 0.92 | 0.75 | 1.00 | 0.86 | –0.37 |
| O | –0.10 | 0.29 | –0.07 | 0.42 | 0.65 | –0.35 | 0.08 | 0.85 | 0.79 | 0.86 | 0.94 | 0.86 | 1.00 | –0.26 |
| Q | –0.01 | –0.18 | 0.10 | 0.60 | 0.52 | –0.51 | –0.33 | –0.17 | –0.39 | –0.37 | –0.25 | –0.37 | –0.26 | 1.00 |

Вариация значений выхода серого шлиха сравнительно невелика (около 30%), а выход легкой фракции вообще стабилен (коэффициент вариации около 7%). Данные факты указывают на стабильность реализации операции первичного гравитационного обогащения на столь большом количестве проб с большой рандомизации по времени проведения экспериментов, что позволяет положительно оценить качество гравитационного фракционирования проб. Среднее значение выхода черного шлиха, аналога промышленного коллективного гравитационного концентрата, равняется 2,0% при вариации значения этого параметра около 50%, что указывает на достаточно равномерное содержание тяжелой фракции во всем объеме месторождения. Выход немагнитной фракции черного шлиха, концентрирующей циркон, колеблется более значительно, и коэффициент вариации его составляет около 70%. Указанный факт лишь косвенно может характеризовать изменчивость содержания циркона, которая далее была определена более точно.

Взаимосвязь количественных показателей гравитационно-магнитного фракционирования, тождественного ожидаемым показателям промышленного обогащения рудных песков месторождения, сводится, в основном, к следующему: количественный выход непродуктивного класса +0,56мм и второй составляющей непродуктивного материала – легкой фракции (хвостов гравитационного обогащения), составляющих в целом единый отвальный продукт, имеют, естественно, между собой отрицательное значение коэффициента парной корреляции (r = –0,86). Также естественная, не очень сильная, связь выхода непродуктивного крупного класса и выхода тяжелой фракции (коллективного гравитационного концентрата) r = –0,18.

Минеральный состав исходных проб**.** Результаты статистической обработки данных по минеральному составу 936 проб разведочных скважин в виде суммарных показателей представлены в табл. 10 и 11. В изученном массиве данных средний выход тяжелых фракций

составляет 2,22% при достаточно невысоком коэффициенте вариации – менее 60%. Достаточно выдержанны содержания ильменита (среднее 0,96%), рутила (среднее 0,28%) и циркона (среднее 0,22%) – коэффициенты вариации значений содержаний этих минералов менее 60%.

Таблица 10. Средние значения и изменчивость параметров исходных рудных песков по 956 пробам

| Критерии | Выход тяжелой фракции от исходной пробы, % | Ильменит +л/ксенизированный ильменит | Лейко-ксен | Рутил | Циркон | Σтитансодержащих минералов в исходной пробе, % | Σрудных минералов в исходной пробе, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Средние значения, % | 2,22 | 0,96 | 0,05 | 0,28 | 0,22 | 1,29 | 1,51 |
| Вариация, % | 58,49 | 56,87 | 123,84 | 57,2 | 57,87 | 56,13 | 54,13 |

Таблиц 11. Коэффициенты парной корреляции параметров исходных рудных песков

| | **C** | **D** | **E** | **F** | **G** | **H** | **I** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **C** | 1,00 | 0,95 | 0,60 | 0,86 | 0,70 | 0,97 | 0,97 |
| **D** | 0,95 | 1,00 | 0,57 | 0,80 | 0,66 | 0,99 | 0,98 |
| **E** | 0,60 | 0,57 | 1,00 | 0,49 | 0,16 | 0,64 | 0,59 |
| **F** | 0,86 | 0,80 | 0,49 | 1,00 | 0,80 | 0,87 | 0,89 |
| **G** | 0,70 | 0,66 | 0,16 | 0,80 | 1,00 | 0,68 | 0,76 |
| **H** | 0,97 | 0,99 | 0,64 | 0,87 | 0,68 | 1,00 | 0,99 |
| **I** | 0,97 | 0,98 | 0,59 | 0,89 | 0,76 | 0,99 | 1,00 |

Примечание: **C** – Выход тяжелой фракции от исходной пробы, %, содержание **D –** ильменит+лейкоксенизированный ильменит, **E –** лейкоксен, **F –** рутил, **G** – циркон, **H –** сумма титансодержащих минералов в исходной пробе, % **, I** – сумма рудных минералов в исходной пробе, %

По изменчивости содержания в объеме Восточного участка месторождения исключение составляет лейкоксен (среднее содержание 0,05%), коэффициент вариации более 120%, что обусловлено повышенной лейкоксенизации ильменита в верхней части рудного пласта.

Сравнительно невелика изменчивость содержаний суммы титановых (среднее 1,29%) и всех рудных (среднее 1,51%) минералов – значения коэффициента вариации обоих параметров находятся на уровне 55%. Выход тяжелой фракции, естественно, связан с содержанием в песках ильменита (r = 0,95), меньше с содержанием рутила (r = 0,86) и циркона (r = 0,70) и менее всего с содержанием в руде лейкоксена (r = 0,60) по вышеприведенной причине.

Содержание ильменита тесно связано с содержанием рутила (r = 0,80), естественно, из-за неравномерного распространения процесса лейкоксенизации в объеме (по высоте) месторождения, слабо – с содержанием лейкоксена (r = 0,57). Несколько неожиданна слабая связь содержаний в рудных песках циркона с содержанием ильменита (r = 0,66), ожидаемо слабая – с содержанием лейкоксена (r = 0,16), но достаточно сильная с содержанием в песках рутила (r = 0,80). Две пары корреляционных связей содержаний в массиве месторождения минералов – ильменита с лейкоксеном и циркона с рутилом, прослеживаются и дальше. Тесная связь содержаний сумм титановых и всех рудных минералов с содержаниями индивидуальных титановых минералов, в первую очередь ильменита (r = 0,99 и 0,98) и рутила (r = 0,87 и 0,89), естественна и ожидаема, также ожидаема и более слабая связь с содержанием лейкоксена (r = 0,64 и 0,59) и циркона (r = 0,68 и 0,76).

При ГТК, проводимом на пробах небольшой массы, прогнозируемое качество коллективных концентратов промышленного предприятия принимается тождественным минеральным составам тяжелых фракций гравитационного разделения исходных проб (табл. 12, 13) Коллективные концентраты проб скважин в среднем содержат 38,75% ильменита, который

характеризуется чрезвычайно высокой стабильностью – коэффициент вариации содержаний равен 17,16%. Содержание рутила – 11,45% также достаточно стабильно – коэффициент вариации 29,27%. Менее стабильно содержание циркона (среднее 7,07%) при коэффициенте вариации 45,94%, а также содержание в тяжелых фракциях из всего объема месторождения лейкоксена – коэффициент вариации 55,02% при среднем значении 3,43%. Сумма рудных минералов в ожидаемом коллективном гравитационном концентрате составляет 60,70% при коэффициенте вариации 10,57%. Данный факт позволяет с достаточной уверенностью прогнозировать стабильную работу доводочного отделения будущего промышленного предприятия. Содержание попутных минералов и влияние их на работу доводочного предприятия можно характеризовать следующим образом.

Таблица 12. Средние значения и изменчивость минерального состава тяжелой фракции, % (по 238 пробам)

| | Ильменит+ л/к ильменит | Лейкоксен | Рутил | Σ титановых минералов | Циркон | Σ рудных минералов | Магнетит | Гранат | Эпидот | Турмалин | Монацит | Ставролит | Кианит | Силлиманит | Апатит | Гидроксиды железа | Глауконит | Кварц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Средние значения | 38,75 | 3,43 | 11,45 | 53,63 | 7,07 | 60,70 | 0,11 | 13,57 | 10,76 | 1,93 | 0,85 | 2,18 | 5,03 | 0,12 | 0,15 | 0,10 | 0,42 | 3,27 |
| Вариация % | 17,16 | 55,02 | 29,27 | 12,28 | 45,94 | 10,57 | 121,17 | 43,88 | 44,61 | 31,78 | 173,51 | 41,11 | 56,14 | 129,74 | 219,0 | 231,66 | 291,79 | 117,57 |

Таблица 13. Коэффициенты парной корреляции содержаний минералов в тяжелой фракции, % (по 238 пробам)

| | Ильменит +л/к ильменит | Лейкоксен | Рутил | Сумма титановых минералов | Циркон | Сумма рудных минералов | Магнетит | Альмандин | Эпидот | Турмалин | Монацит | Ставролит | Кианит | Силлиманит | Апатит | Гидроксиды железа | Глауконит | Кварц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **C** | **D** | **E** | **f** | **g** | **h** | **i** | **j** | **k** | **l** | **m** | **n** | **o** | **p** | **q** | **r** | **s** | **t** |
| **C** | 1,00 | 0,56 | –0,52 | 0,91 | –0,46 | 0,70 | –0,31 | –0,58 | 0,15 | –0,10 | –0,03 | –0,22 | 0,53 | –0,56 | 0,03 | 0,07 | –0,24 | –0,43 |
| **D** | 0,56 | 1,00 | –0,52 | 0,58 | –0,50 | 0,34 | –0,39 | –0,43 | 0,12 | 0,06 | –0,01 | –0,30 | 0,68 | –0,53 | 0,25 | 0,16 | –0,08 | –0,29 |
| **E** | –0,52 | –0,52 | 1,00 | –0,16 | 0,60 | 0,14 | 0,52 | 0,30 | –0,30 | 0,07 | –0,26 | 0,34 | –0,59 | 0,64 | –0,24 | –0,07 | –0,09 | 0,22 |
| **f** | 0,91 | 0,58 | –0,16 | 1,00 | –0,30 | 0,88 | –0,16 | –0,56 | 0,03 | –0,04 | –0,17 | –0,13 | 0,43 | –0,39 | –0,03 | 0,08 | –0,31 | –0,40 |
| **g** | –0,46 | –0,50 | 0,60 | –0,30 | 1,00 | 0,20 | 0,41 | 0,25 | –0,45 | –0,05 | 0,08 | 0,22 | –0,64 | 0,38 | –0,15 | 0,03 | –0,02 | 0,17 |
| **h** | 0,70 | 0,34 | 0,14 | 0,88 | 0,20 | 1,00 | 0,04 | –0,45 | –0,20 | –0,07 | –0,13 | –0,03 | 0,12 | –0,21 | –0,10 | 0,10 | –0,33 | –0,32 |
| **i** | –0,31 | –0,39 | 0,52 | –0,16 | 0,41 | 0,04 | 1,00 | 0,13 | –0,33 | 0,11 | –0,11 | 0,31 | –0,46 | 0,57 | –0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,34 |
| **j** | –0,58 | –0,43 | 0,30 | –0,56 | 0,25 | –0,45 | 0,13 | 1,00 | –0,38 | 0,00 | –0,15 | 0,13 | –0,29 | 0,29 | –0,05 | –0,24 | –0,07 | –0,05 |
| **k** | 0,15 | 0,12 | –0,30 | 0,03 | –0,45 | –0,20 | –0,33 | –0,38 | 1,00 | –0,01 | –0,01 | –0,08 | 0,20 | –0,14 | –0,04 | 0,17 | –0,12 | –0,24 |
| **l** | –0,10 | 0,06 | 0,07 | –0,04 | –0,05 | –0,07 | 0,11 | 0,00 | –0,01 | 1,00 | 0,05 | 0,22 | –0,01 | 0,20 | 0,08 | 0,01 | –0,14 | 0,04 |
| **m** | –0,03 | –0,01 | –0,26 | –0,17 | 0,08 | –0,13 | –0,11 | –0,15 | –0,01 | 0,05 | 1,00 | –0,20 | –0,13 | –0,08 | 0,18 | 0,12 | 0,17 | 0,03 |
| **n** | –0,22 | –0,30 | 0,34 | –0,13 | 0,22 | –0,03 | 0,31 | 0,13 | –0,08 | 0,22 | –0,20 | 1,00 | –0,18 | 0,32 | –0,21 | 0,05 | –0,18 | –0,03 |
| **o** | 0,53 | 0,68 | –0,59 | 0,43 | –0,64 | 0,12 | –0,46 | –0,29 | 0,20 | –0,01 | –0,13 | –0,18 | 1,00 | –0,57 | 0,12 | 0,02 | –0,17 | –0,45 |
| **p** | –0,56 | –0,53 | 0,64 | –0,39 | 0,38 | –0,21 | 0,57 | 0,29 | –0,14 | 0,20 | –0,08 | 0,32 | –0,57 | 1,00 | –0,12 | –0,07 | 0,00 | 0,34 |
| **q** | 0,03 | 0,25 | –0,24 | –0,03 | –0,15 | –0,10 | –0,15 | –0,05 | –0,04 | 0,08 | 0,18 | –0,21 | 0,12 | –0,12 | 1,00 | –0,07 | 0,01 | 0,11 |
| **r** | 0,07 | 0,16 | –0,07 | 0,08 | 0,03 | 0,10 | 0,00 | –0,24 | 0,17 | 0,01 | 0,12 | 0,05 | 0,02 | –0,07 | –0,07 | 1,00 | –0,05 | –0,10 |
| **s** | –0,24 | –0,08 | –0,09 | –0,31 | –0,02 | –0,33 | 0,00 | –0,07 | –0,12 | –0,14 | 0,17 | –0,18 | –0,17 | 0,00 | 0,01 | –0,05 | 1,00 | 0,58 |
| **t** | –0,43 | –0,29 | 0,22 | –0,40 | 0,17 | –0,32 | 0,34 | –0,05 | –0,24 | 0,04 | 0,03 | –0,03 | –0,45 | 0,34 | 0,11 | –0,10 | 0,58 | 1,00 |

Количество тяжелого сильномагнитного магнетита невелико, составляет в среднем 0,11%, поэтому большой коэффициент вариации его значения ($V_0$>120%) существенно не скажется на процессе доводки. Количество слабомагнитных гранатов средней плотности, в основном альмандина, значительно и составляет в среднем 13,57% при достаточно выдержанных значениях – коэффициент вариации 43,88%, что стабилизирует достаточно непростой процесс выделения этого минерала. Среднее содержание эпидота, который также затрудняет доводку коллективного гравитационного концентрата, составляет 10,76% при коэффициенте вариации 44,61%. Влияние турмалина на процесс доводки будет меньшим из-за небольшого содержания его в коллективно гравитационном концентрате – менее 2% и малого коэффициента вариации 31,78%. Достаточно сложной проблемой является содержание в тяжелой фракции монацита, среднее значение которого равно 0,85% при весьма большой неравномерности распределения его в тяжелых фракциях по объему месторождения – коэффициент вариации превышает 170%.

Попутные компоненты. Практический интерес представляют ставролит и кианит, среднее содержание которых составляют 2,18 и 5,03% при выдержанных значениях их – коэффициент вариации 41,11 и 56,14% соответственно. Силлиманит (среднее содержание в тяжёлой фракции 0,12% при коэффициенте вариации около 130%) представляет меньший интерес. Количество апатита невелико – в среднем 0,15% при весьма неравномерном его распределении – коэффициент вариации более 200%. Особо следует оговорить данные по глаукониту (среднее содержание в тяжёлой фракции 0,42% при коэффициенте вариации более 200%).

Основная масса глауконита перешла при фракционировании проб в легкие фракции, которые не подвергались оптико-минералогическому анализу. Исходя из сказанного, делать какие-либо выводы по глаукониту (за исключение необходимости постановки специальных работ) невозможно. Коэффициент парной корреляции с содержаний кварца и такого же легкого глауконита составляет 0,58%.

Корреляционные связи содержаний основных рудных минералов в ожидаемых коллективных гравитационных концентратах следующие. Положительная связь содержаний ильменита и лейкоксена (r = 0,56), но отрицательна с содержаниями рутила и циркона (r = –0,52 и –0,46), что отражает «вытеснение» одних тяжелых рудных минералов другими. Также отрицательна связь содержаний ильменита с содержанием гранатов (r = –0,58), слабо отрицательная со ставролитом (r = –0,22) и положительная с кианитом (r = 0,53). Обращают внимание положительная связь содержаний рутила и циркона (r = 0,60).

В целом, выявляются два «сообщества» рудных минералов в тяжелой фракции: ильменита с лейкоксеном (r = 0,56) и рутила с цирконом (r = 0,60) при отрицательных значениях связи между этими двумя группами (для пар содержаний ильменит и лейкоксен с содержаниями рутила и циркона коэффициенты парной корреляции находятся в диапазоне от –0,46 до –0,52).

Содержание кианита положительно связано с содержанием ильменита и лейкоксена (r = 0,53 и 0,68) и отрицательно с содержанием рутила и циркона (r равно соответственно –0,64 и –0,46). Содержание монацита характерно слабой отрицательной связью с содержанием всех рудных минералов (коэффициент парной корреляции с содержанием циркона 0,08, для остальных рудных минералов от –0,01 до –0,15). Содержания кианита и силлиманита имеют отрицательную связь (r = –0,57), при этом уже традиционно при положительной связи содержания кианита с ильменита (r = 0,53), связь силлиманита с ильменитом отрицательна (r = –0,56).

Содержания в тяжелых фракциях кварца и тяжелых рудных минералов имеют, как правило, отрицательное значение коэффициентов парной корреляции и положительное с содержанием легких минералов, в первую очередь глауконита.

Стабильный состав тяжелых фракций – аналогов коллективных гравитационных концентратов будущей промышленной отработки месторождения подтверждает наличие единого технологического типа и технологии доводки этих концентратов.

Выход коллективного гравитационного концентрата в среднем ожидается равным 2,22%, ильменитового концентрата – 1,02%, рутилового – 0,26% и цирконового – 0,21%. Продуктивность

одного куб.м. ожидается в среднем по ильмениту (ильменитовому концентрату) – 18,82 кг, рутилу – 4,81 кг и циркону – 3,96 кг, по условному ильмениту (соотношение ильменита, рутила и циркона = 1 : 5 : 5) – 62,67 кг (табл. 14).

Изменчивость всех перечисленных семи параметров продуктивности исходных песков по рудным концентратам, как и выхода по массе коллективного гравитационного концентрата, достаточно стабильна – значения коэффициентов вариации не выходят за пределы значений 53 – 59% (табл. 15).

Таблица 14. Средние содержания и изменчивость минерального состава редкометалльно-титановых песков (940 проб)

| | Выход тяжелой фракции, % | Содержание, вес.% | | | Содержание, кг/куб.м | | | Условный ильменит |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ильменит | Рутил | Циркон | Ильменит | Рутил | Циркон | |
| Средние значения | 2,22 | 1,02 | 0,26 | 0,21 | 18,82 | 4,81 | 3,96 | 62,67 |
| Вариация, % | 58,86 | 57,72 | 58,24 | 58,41 | 57,72 | 58,24 | 58,41 | 53,31 |

Таблица 15. Зависимость продуктивности основных рудных минералов исходных песков (940 проб)

| | **C** | **D** | **E** | **F** | **G** | **H** | **I** | **J** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **C** (выход тяжелой фракции, %) | 1,00 | 0,96 | 0,88 | 0,70 | 0,96 | 0,88 | 0,70 | 0,921 |
| **D** (ильменит, %) | 0,96 | 1,00 | 0,83 | 0,64 | 1,00 | 0,83 | 0,64 | 0,893 |
| **E** (рутил, %) | 0,88 | 0,83 | 1,00 | 0,79 | 0,83 | 1,00 | 0,79 | 0,962 |
| **F** (циркон, %) | 0,70 | 0,64 | 0,79 | 1,00 | 0,64 | 0,79 | 1,00 | 0,885 |
| **G** (ильменит, кг/м$^3$) | 0,96 | 1,00 | 0,83 | 0,64 | 1,00 | 0,83 | 0,64 | 0,893 |
| **H** (рутил, кг/м$^3$) | 0,88 | 0,83 | 1,00 | 0,79 | 0,83 | 1,00 | 0,79 | 0,962 |
| **I** (циркон, кг/м$^3$) | 0,70 | 0,64 | 0,79 | 1,00 | 0,64 | 0,79 | 1,00 | 0,885 |
| **J** (усл.ильменит, кг/м$^3$) | 0,92 | 0,89 | 0,96 | 0,89 | 0,89 | 0,96 | 0,89 | 1,00 |

Продуктивность по ильмениту и рутилу тесно связана с выходом коллективного гравитационного концентрата (r = 0,96 и 0,88 соответственно), а по циркону связь менее сильная (r = 0,70). Величины продуктивности по ильмениту и рутилу имеют высокую взаимную связь (r = 0,83), взаимосвязь продуктивности по рутилу и циркону также достаточно высокая (r = 0,79), а по ильмениту и циркону наиболее слабае (r = 0,64). Проявляется тенденция (статистическая) более тесной связи продуктивности по ильмениту и рутилу, а также рутила и циркона.

Результаты статистической обработки данных по массе продуктов гравитационно-магнитного фракционирования 750 исходных проб и максимально возможных выходов рудных концентратов – ильменитового, рутилового и цирконового (табл. 16, 17) – показали, что: – продуктивность по всем трем основным рудным минералам с количеством непродуктивного класса крупностью +0,56мм практически не связана (r от 0,08 до –0,21); – товарная продуктивность не связана с выходом легкой фракции (r от 0,19 до –0,07), но слабо отрицательно связана с выходом промпродуктов гравитационного обогащения (легкой фракции перечистки серого шлиха, r от –0,20 до –0,32); – велики связи товарных продуктивностей с выходом тяжелой фракции (тоже черный шлих, прогнозируемый коллективный гравитационный концентрат) коэффициенты парной корреляции для рутила и ильменита находятся на уровне 0,91 – 0,94, циркона 0,84.

Далее строятся графо-аналитические зависимости содержания трех основных рудных минералов и выхода тяжелой фракции (или прогнозируемых выходов ильменитового, рутилового и цирконового концентратов от выхода коллективного гравитационного концентрата при промышленной отработке месторождения).

Таблица 16. Средние значения и изменчивость результатов гравитационно-магнитного обогащения и количеств извлекаемых рудных минералов

| | Выход от исходной массы, % | | | Перечистка серого шлиха, % | | | | Магнитное разделение черного шлиха | | | | | | | Результаты мин.анализа | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Класс +0,56 мм | Серый шлих | Легкая фракция | Черный шлих | | Легк.фр. | | I | | II | | III | | н/маг | Выход тяжелой фракции | Содержание, вес.% | | |
| | | | | от срого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | от черного шлиха | от исх. | от черного шлиха | от исх. | от черного шлиха | от исх. | от исх. | | Ильменит | Рутил | Циркон |
| Среднее значение | 3,53 | 9,59 | 86,9 | 21,98 | 2,00 | 77,39 | 7,52 | 17,89 | 0,45 | 6,83 | 0,17 | 9,55 | 0,24 | 1,14 | 2,00 | 0,92 | 0,25 | 0,22 |
| Стандартное отклонение | 5,01 | 3,10 | 6,10 | 11,44 | 1,06 | 12,77 | 3,22 | 13,49 | 0,47 | 7,58 | 0,24 | 10,78 | 0,31 | 0,74 | 1,06 | 0,48 | 0,15 | 0,12 |
| Вариация, % | 142,08 | 32,27 | 7,01 | 52,06 | 53,1 | 16,50 | 42,75 | 75,40 | 106,19 | 111,04 | 141,11 | 112,95 | 131,89 | 64,90 | 52,89 | 52,27 | 58,38 | 57,32 |

Таблица 17. Значения коэффициентов парной корреляции результатов гравитационно-магнитного обогащения и количества извлеченных рудных минералов

| | Выход от исходной массы | | | Перечистка серого шлиха | | | | Магнитное разделение черного шлиха | | | | | | н/магн от исх. | Выход тяжелой фракции | Содержание, вес.% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Класс +0,56 мм | Серый шлих | Легкая фракция | Черный шлих | | Легк.фр. | | I | | II | | III | | | | Ильменит | Рутил | Циркон |
| | | | | от серого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | от серого шлиха | от исх. | | | | | |
| | **E** | **F** | **G** | **H** | **I** | **J** | **K** | **L** | **M** | **N** | **O** | **P** | **Q** | **S** | **T** | **U** | **V** | **W** |
| **E** | 1,00 | 0,07 | –0,86 | –0,20 | –0,17 | 0,13 | 0,11 | –0,17 | –0,16 | –0,15 | –0,17 | –0,04 | –0,09 | –0,05 | –0,17 | –0,21 | –0,08 | 0,08 |
| **F** | 0,07 | 1,00 | –0,57 | –0,32 | 0,07 | 0,25 | 0,91 | 0,12 | 0,15 | 0,32 | 0,30 | 0,32 | 0,29 | –0,21 | 0,07 | –0,03 | 0,09 | 0,01 |
| **G** | –0,86 | –0,57 | 1,00 | 0,32 | 0,10 | –0,24 | –0,56 | 0,08 | 0,06 | –0,03 | –0,02 | –0,13 | –0,07 | 0,15 | 0,10 | 0,19 | 0,02 | –0,07 |
| **H** | –0,20 | –0,32 | 0,32 | 1,00 | 0,87 | –0,83 | –0,56 | 0,52 | 0,64 | 0,26 | 0,41 | 0,22 | 0,42 | 0,53 | 0,87 | 0,87 | 0,79 | 0,80 |
| **I** | –0,17 | 0,07 | 0,10 | 0,87 | 1,00 | –0,73 | –0,23 | 0,63 | 0,80 | 0,46 | 0,65 | 0,39 | 0,65 | 0,44 | 0,99 | 0,94 | 0,91 | 0,84 |
| **J** | 0,13 | 0,25 | –0,24 | –0,83 | –0,73 | 1,00 | 0,60 | –0,42 | –0,53 | –0,20 | –0,33 | –0,16 | –0,35 | –0,45 | –0,74 | –0,75 | –0,68 | –0,69 |
| **K** | 0,11 | 0,91 | –0,56 | –0,56 | –0,23 | 0,60 | 1,00 | –0,07 | –0,10 | 0,17 | 0,09 | 0,19 | 0,08 | –0,33 | –0,24 | –0,32 | –0,20 | –0,25 |
| **L** | –0,17 | 0,12 | 0,08 | 0,52 | 0,63 | –0,42 | –0,07 | 1,00 | 0,89 | 0,88 | 0,80 | 0,86 | 0,85 | –0,30 | 0,62 | 0,49 | 0,58 | 0,41 |
| **M** | –0,16 | 0,15 | 0,06 | 0,64 | 0,80 | –0,53 | –0,10 | 0,89 | 1,00 | 0,75 | 0,88 | 0,69 | 0,90 | –0,16 | 0,79 | 0,66 | 0,73 | 0,56 |
| **N** | –0,15 | 0,32 | –0,03 | 0,26 | 0,46 | –0,20 | 0,17 | 0,88 | 0,75 | 1,00 | 0,88 | 0,92 | 0,86 | –0,48 | 0,45 | 0,28 | 0,44 | 0,19 |
| **O** | –0,17 | 0,30 | –0,02 | 0,41 | 0,65 | –0,33 | 0,09 | 0,80 | 0,88 | 0,88 | 1,00 | 0,75 | 0,94 | –0,35 | 0,65 | 0,47 | 0,61 | 0,35 |
| **P** | –0,04 | 0,32 | –0,13 | 0,22 | 0,39 | –0,16 | 0,19 | 0,86 | 0,69 | 0,92 | 0,75 | 1,00 | 0,86 | –0,49 | 0,39 | 0,21 | 0,41 | 0,23 |
| **Q** | –0,09 | 0,29 | –0,07 | 0,42 | 0,65 | –0,35 | 0,08 | 0,85 | 0,90 | 0,86 | 0,94 | 0,86 | 1,00 | –0,37 | 0,64 | 0,45 | 0,63 | 0,42 |
| **S** | –0,05 | –0,21 | 0,15 | 0,53 | 0,44 | –0,45 | –0,33 | –0,30 | –0,16 | –0,48 | –0,35 | –0,49 | –0,37 | 1,00 | 0,43 | 0,57 | 0,36 | 0,55 |
| **T** | –0,17 | 0,07 | 0,10 | 0,87 | 0,99 | –0,74 | –0,24 | 0,62 | 0,79 | 0,45 | 0,65 | 0,39 | 0,64 | 0,43 | 1,00 | 0,94 | 0,92 | 0,85 |
| **U** | –0,21 | –0,03 | 0,19 | 0,87 | 0,94 | –0,75 | –0,32 | 0,49 | 0,66 | 0,28 | 0,47 | 0,21 | 0,45 | 0,57 | 0,94 | 1,00 | 0,86 | 0,80 |
| **V** | –0,08 | 0,09 | 0,02 | 0,79 | 0,91 | –0,68 | –0,20 | 0,58 | 0,73 | 0,44 | 0,61 | 0,41 | 0,63 | 0,36 | 0,92 | 0,86 | 1,00 | 0,85 |
| **W** | 0,08 | 0,01 | –0,07 | 0,80 | 0,84 | –0,69 | –0,25 | 0,41 | 0,56 | 0,19 | 0,35 | 0,23 | 0,42 | 0,55 | 0,85 | 0,80 | 0,85 | 1,00 |

Уравнение указанных зависимостей имеет следующий вид:

Выход ильменитового концентрата от массы исходных песков (%)

$$\mathbf{Ilm = 0{,}427\gamma_{т.фр.} + 0{,}062 \text{ при } R^2 = 0{,}8902,}$$

Выход рутилового концентрата от массы исходных песков (%)

$$\mathbf{Ru = 0{,}1279\gamma_{т.фр.} - 0{,}0029 \text{ при } R^2 = 0{,}8398,}$$

Выход цирконового концентрата от массы исходных песков (%)

$$\mathbf{Zr = 0{,}0997\gamma_{т.фр.} + 0{,}017 \text{ при } R^2 = 0{,}7232,}$$

где $\gamma_{т.фр}$ – выход тяжелой фракции при гравитационном фракционировании от массы пробы исходных рудных песков; $R^2$ – величина достоверности аппроксимации.

Линейные зависимости извлечения диоксидов титана и циркония от их содержания в исходных рудных песках, а также от содержания черного шлиха в пробах, позволяют с достаточной степенью надежности рассчитывать ожидаемое извлечение диоксидов титана и циркония по соответствующим математическим формулам.

Параметры технологического передела рудных песков (выход товарных концентратов, извлечение полезных компонентов) определяются двумя основными факторами: – качеством исходного сырья, поступающего на обогащение; – технологической схемой обогащения (набор и последовательность технологических операций, аппаратурное обеспечение, режимные параметры и др.).

Соответствующие графо-аналитические зависимости с приведенными формулами и величинами достоверности аппроксимации могут использоваться для прогнозирования некоторых параметров вещественного состава и технологических свойств. Такой пересчёт достаточно корректен с учётом высокой степени зависимости извлечений и содержаний ценных компонентов, выявленных в результате проведения данных исследований (для диоксида титана r = от 0,88 до 0,94, для диоксида циркония – от 0,69 до 0,77). В дальнейшем эти зависимости должны быть уточнены на большем числе проб в процессе доразведки и эксплуатации месторождения.

## Заключение

На основе установленных критериев оценки технологических свойств титан-циркониевых россыпей были разработаны и утверждены Научным советом по методам технологических исследований при ФГУП «ВИМС» методические рекомендации № 100 «Опережающая технологическая оценка титан-циркониевых россыпей на ранних стадиях ГРР», предназначенные для научно-исследовательских и производственных организаций, ведущих разведку и отработку данного вида минерального сырья, позволяют с минимальными временными, трудовыми и материальными затратами определять технологические свойства и продуктивность новых объектов, проводить геолого-технологическое картирование разведуемых и опережающее технологическое опробование отрабатываемых месторождений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьева А.В., Левченко Е.Н., Левченко М.Л. Минералого-технологические исследования на Семеновской поисково-разведочной площади. М. Материалы годичной сессии МО Российского геологического общества «Минералогические исследования в решении геологических проблем. 2005. С. 41–44.
2. Левченко Е.Н. Влияние вещественного состава на технологические свойства титан-циркониевых россыпей. М. Разведка и охрана недр. 2004. № 11. С. 44–48.
3. Левченко Е.Н. Особенности вещественного состава титан-циркониевых россыпей России. М. Литология и полезные ископаемые. 2006. № 2. С. 134–152.
4. Левченко Е.Н. Прогнозная оценка технологических свойств редкометалльных руд и россыпей на ранних стадиях ГРР. М. Разведка и охрана недр. 2006. № 9–10. С. 42–48.
5. Левченко Е.Н. Прогнозирование технологических свойств титан-циркониевых россыпей России. – М.: ИМГРЭ. 2007. 199 с.
6. Е.Н.Левченко. Геолого-технологическое картировании титано-циркониевых россыпей (на примере Восточного участка Центрального месторождения. – М.: ИМГРЭ. 2011, 146 с.

7. Е.Н.Левченко. Научно-методическое обоснование минералого-технологической оценки редкометалльно-титановых россыпей, Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. – М.: ИМГРЭ. 2011, 46 с.

# ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО БЛАГОРОДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ

***Черепанов А.А.*** [1]***, Александрова Т.Н.*** [2]***, Бердников Н.В.*** [1]

[1]ИТ иГ ДВО РАН, г. Хабаровск
[2]ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск

В настоящее время у исследователей и среди геологов-практиков наблюдается повышенный интерес к благороднометалльной минерализации углеродистых сланцев. Их перспективность в качестве источника золота и платиноидов определяется широкой распространенностью во многих регионах мира, многочисленными аналитическими данными о высоких содержаниях в них благородных металлов, а также примерами связи с ними крупных месторождений золото-платиновых руд. С мощными выдержанными толщами черных сланцев, обычно пронизанных кварцевыми жилами, зачастую связаны крупные месторождения золота. В то же время отмечается крайняя нестабильность результатов анализов содержаний благородных металлов (от очень значительных до практически нулевых в зависимости от применяемых методов) и неэффективность технологий извлечения тонкодисперсных благородных металлов из упорных углеродистых руд.

Черносланцевые толщи на Дальнем Востоке России неоднородны по составу и происхождению. Наряду с типичными черными сланцами выделяются высокоуглеродистые породы, для которых характерно повышенное (до 20% и более) содержание углерода и более высокая степень его метаморфизма (до графита). Распространены они локально, иногда представляя собой своеобразные «углеродистые метасоматиты».

Нами с применением разнообразных химико-аналитических, электронно-микроскопических и минералого-технологических методов исследований изучены высокоуглеродистые породы кимканской и сутырской толщ на востоке Буреинского массива.

Сутырская толща ($PR_1st$) слагает протяженный (75 х 5 км) тектонический блок в зоне Хинганского глубинного разлома. В ее составе преобладают неравномерно метаморфизованные в зеленосланцевой фации углеродистые сланцы, филлиты, метаалевролиты с содержанием $C_{орг}$ до 22 мас. %. Сланцы в различной степени сульфидизированы, иногда содержат сеть тонких кварцевых прожилков. Сульфиды (пирит, в меньшей мере пирротин, халькопирит, арсенопирит, ковелин, марказит) образуют мелкую (до 1 мм) вкрапленность, иногда прожилки и линзочки размером до 0,5–2 см. Углеродистый материал представлен тонкодисперсным аморфным агрегатом и тонкими чешуйками графита (0,001–0,03 мм). Полуколичественным спектральным анализом в породах свиты ранее диагностировалось золото (до 0,1 г/т), платина (до 0,04 г/т) и палладий (до 0,01 г/т).

В Кимканском прогибе изучались углеродсодержащие сланцы и углисто-известковые породы лондоковской и мурандавской свит и кимканской толщи, имеющих протяженность первые десятки км и мощность от сотен метров до первого км. Основное внимание уделялось кимканской толще ($Є_1km$), сложенной преимущественно терригенными и кремнистыми отложениями, выходящими на поверхность в ядрах синклинальных складок. По литологическим признакам толща подразделена на две подтолщи: нижнюю – кремнисто-терригенную с повышенной углеродностью и верхнюю – терригенную с повышенной известковистостью.

Углеродистым сланцам характеризуемых толщ свойственна черная окраска, массивная или тонкополосчатая текстура, обусловленная концентрацией в тонких (1–2 мм) слойках аморфного углеродистого вещества, содержание которого достигает 3–9, реже 12–25%. Местами они за счет контактового метаморфизма переходят в графитовые и графитистые сланцы. В них содержится рассеянная, редко концентрированная сульфидная (пиритовая или пирротиновая) минерализация, образующая тонкие послойные выделения. Для углеродистых пород характерны повышенные содержания V, Cr, Mo, Pb, Ag, Ga, U, реже Zn, спородически отмечается Au, Pt и Pd.

Результаты определения МПГ в пробах черных сланцев, выполненных с применением современных высокочувствительных методов в различных лабораториях отличаются на 2–4 порядка. Так, при анализе одной и той же пробы в СВКНИИ (Магадан) получили содержание Pt 0,6 г/т, ГЕОХИ (Москва) –130 г/т [1] . Ниже в таблице 1 приведены результаты анализа наших проб, полученные с применением различных методов и реактивов.

Таблица 1. Результаты определений золота и платиноидов в высокоуглеродистых породах разными методами, г/т.

| Элемент | Данные анализов различными методами, г/т | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Полуколичественный рентгеноспектральный (ФГУП Дальгеофизика) | ICP-MS (ИТиГ ДВО РАН) | | ICP-MS со сплавлением с NiS + соосождение с Te (НИГИ, Индия) | Пробирный (ФГУП Дальгеофизика) | Эмиссионная масс-спектрометрия (ИОЧМ РАН) | ААС после плазменной плавки (ООО Афинор) | Нейтронная активация с облучением от лабораторного источника (ИХ ДВО РАН) | Нейтронная активация с облучением в реакторе (ФГУП ГХК) |
| | | Кислотное разложение + соосаждение с Te | Многостадийное кислотное разложение в микроволновке + соосождение с Te | | | | | | |
| Au | до 0,1 | до 0,34 | 0,2–1,3 | до 1,43 | до 0,01 | 11–76 | 30–47 | Сумма Au+PGE 39–100 | 0,022 |
| Pt | до 0,04 | до 0,01 | 0,02–0,6 | до 0,07 | <0,03 | 1,2–27 | 99–105 | | 12–55 |
| Pd | до 0,01 | до 0,03 | до 0,3 | до 0,09 | до 0,02 | 8–80 | 45–48 | | |
| Os | | | | до 0,02 | | 4,2–22 | | | |
| Re | | | | до 0,21 | | 1,6–10,4 | | | 0,21 |
| Ir | | | до 0,1 | | | 2,2–16 | | | |
| Ru | | | до 0,02 | до 0,01 | | 1–25 | | | 11 |

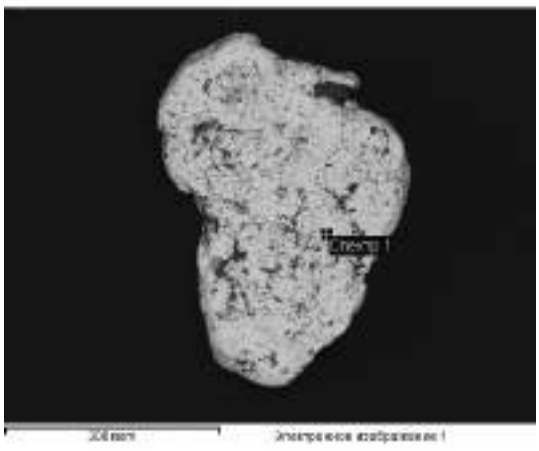
Приведенные в таблице методы могут быть разделены на две группы: занижающие и завышающие реальные содержания. К «занижающим» методам мы относим все методы, связанные с кислотным разложением проб (ICP-MS с кислотным разложением) и методы, в которых при пробоподготовке используются высокие температуры (ICP-MS со сплавлением с NiS, пробирный). При кислотном разложении происходит неполное вскрытие (растворение содержащих благородные металлы фаз) пробы. В осадках после кислотного разложения нами методом РЭМ-РСМА часто обнаруживались микровключения, обогащенные благородными металлами. При сплавлении часть благородных металлов, по-видимому, образует с углеродом летучие соединения и покидает пробу. К «завышающим» методам относятся ядерно-физические, эмиссионная масс-спектрометрия и атомно-абсорбционный анализ в ООО «Афинор». Причины завышения содержаний благородных металлов первыми двумя методами являются следствием методических недоработок, а в случае атомной абсорбции – неучет спектральных наложений. Основной же причиной разброса данных являются форма нахождения благородных металлов в сланцах, исключительная устойчивость комплексных металлоорганических соединений и влияние свободного углерода.

По данным усовершенствованного анализа проб методом ICP-MS с кислотным вскрытием проб получены содержания Pd, Pt и Au от тысячных долей г/т до первых г/т (табл.2). Содержание Ag по данным ICP-MS колеблется от 2 до 5 г/т, по данным РФА 8–10 г/т.

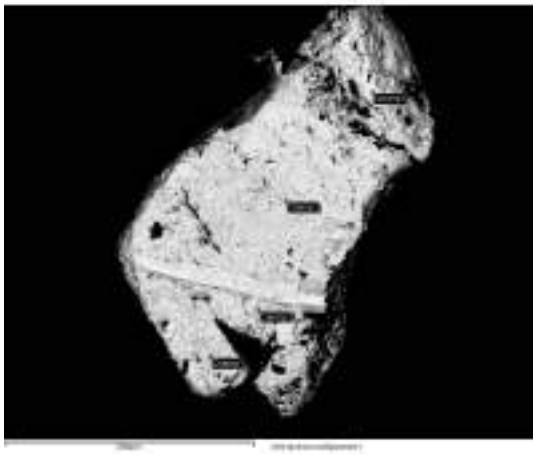
В опытном порядке в качестве окислителя углерода были использованы хлорная кислота ($HCLO_4$) и хромовый ангидрид ($CrO_3$). Содержания Pt, Ag и частично Au повысились более чем на порядок. Максимальные содержания Pt в отдельных пробах составили 16,4 г/т, Ag – 25 г/т.

Таблица 2. Пределы и средние содержания основных благородных металлов в углеродистых породах Буреинского массива

| Свита,толща | Кол-во проб | Содержание, г/т | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Pd | | Pt | | Au | |
| | | среднее | max | среднее | max | среднее | max |
| Сутырская | 17 | 0,065 | 0,36 | 0,03 | 0,128 | 0,634 | 4,398 |
| Лондоковская | 6 | 0,005 | 0.012 | 0,044 | 0,113 | 0,307 | 1,179 |
| Кимканская – верхняя подсвита | 4 | 0,015 | 0,018 | 0,019 | 0,297 | 1,010 | 1,363 |
| Кимкан – нижняя подсвита | 28 | 0,154 | 1,050 | 0,046 | 0,297 | 0,307 | 3,153 |
| Мурандавская | 4 | 0.101 | 0.202 | 0,004 | 0,007 | 0,040 | 0,079 |



а



б

**Рис. 1. Морфология относительно крупных включений золота (а) и платины (б)**

Ранее в черных сланцах собственные минералы МПГ не были известны. Они найдены в виде мельчайших включений в аншлифах с помощью сканирующей электронной микроскопии [2,3].

Изучены формы нахождения благородных металлов в виде включений и микровключений [4]. Первые представлены относительно крупными (сотые-десятые доли миллиметра) выделениями золота (рис.1). Форма золотин чешуйчатая, пластинчатая, лепешковидная, комковатая, иногда окатанная. Цвет желтый, красновато- и зеленовато-желтый, на поверхности золотин встречаются графитовые и лимонитовые корочки. По данным энергодисперсионного микроанализа в качестве главной примеси в составе золотин присутствует серебро (2–19 вес. %). Обнаружены также единичные уплощенные серебристо-белые зерна платины в виде поликсена (9–12 вес. % железа) размером 0,3–0,5 мм. Такие включения встречаются редко и обнаружены в продуктах гравитационного обогащения.

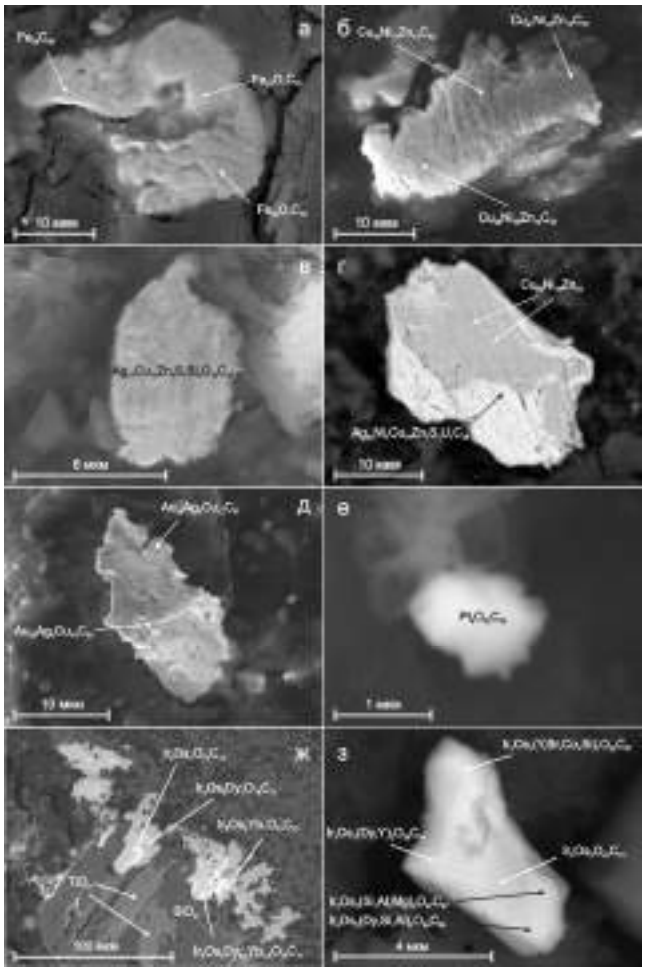


**Рис. 2. Выделения самородных металлов в углеродистом сланце сутырской толщи (а–д, ж – аншлиф, е, з – осадок после кислотного растворения): а – железа; б – меди; в – серебра; г – комбинированное медь–серебро; д – золота; е – платины; ж, з – осмистого иридия**

Вторую форму минерализации образуют микровключения, имеющие размер от долей до первых десятков микрона (рис. 2,3). Включения, содержащие самородные металлы найдены в аншлифах с помощью сканирующей электронной микроскопии [1]. Наличие благородных металлов подтверждено изучением состава осадка, остающегося после химического растворения породы. Обнаружены включения серебра, меди с примесью никеля, цинка, а также золота, платины и осмистого иридия. Основными особенностями этих выделений являются значительные количества углерода, кислорода и других примесей в составе, небольшие (первые микрометры) размеры, и высокая устойчивость к кислотному разложению. Это новые природные формы выделения благородных металлов, характерные для графитовых сланцев – металл-углерод-кислородные композиты состава (Au, МПГ)$_a$C$_b$O$_c$D, где D – примеси, а a,b,c варьируют в широких пределах. Относительная частота встречаемости включений Ag–Au–Pt примерно 100:10:1. Относительно крупные частицы устанавливаются в очень редких случаях при минералогических исследованиях и извлекаются в гравитационный и флотационные концентраты.

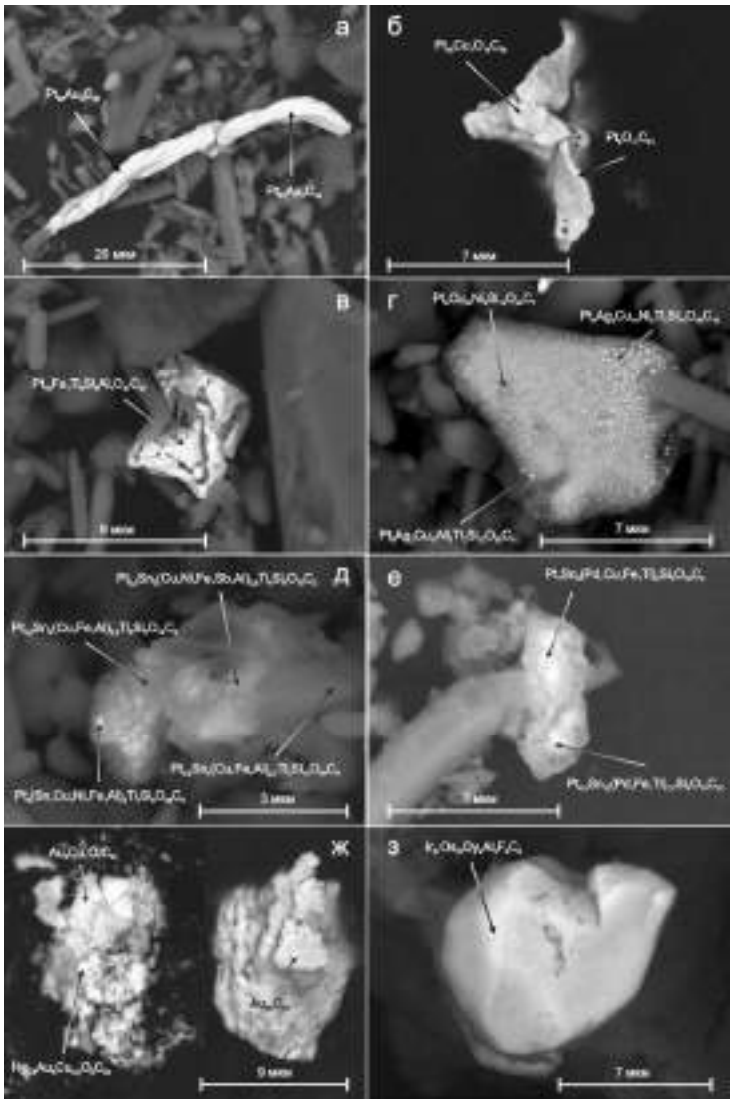



**Рис. 3. Включения благородных металлов в углеродистых сланцах кимканской толщи (осадок после кислотного растворения): а – проволочки; б – пластинки; в – футляровидный кристалл; г, д – тонкодисперсные агрегаты; е – беструктурное (аморфное?); ж – тонкодисперсное комковатое золото; з – зерно осмистого иридия**

Наилучшее доказательство наличия ЭПГ в черных сланцах – технологическое и металлургическое извлечение из них ЭПГ и золота. Углеродсодержащие руды – технологически упорные, содержащие значительное количество благородных и редких металлов, рассеянных в матрице. Они не подаются извлечению при переработке существующими технологиями. Разработаны методики окислительного обжига при 500–1000°С, окислительно-восстановительное плавление на свинцовый и медные сплавы. Однако ни одним из известных способов химической и термохимической обработки не удается достичь достаточной полноты вскрытия упорной части матрицы сырья или достаточной проницаемости для растворов.

В ИГД ДВО РАН выполнены минералого-технологические исследования двух проб углеродистых сланцев из сутырской толщи (100 кг) и кимканской (70 кг). Исследования проводились по классической гравитационно-флотационной схеме обогащения [5].

Изучаемые толщи отличаются монотонным строением, особых различий в их составе не выявлено. Пробы отбирались без предварительного опробования из свалов по разрезу длиной 800 м (сутырская толща) и из коренного обнажения пород кимканской толщи. Опробованная мощность последней пробы – 5 м.

Сутырская проба представлена графитистыми и филлитовидными сланцами, испытавшими региональный метаморфизм в зеленосланцевой стадии и более поздний наложенный метасоматоз, выразившейся в образовании кварц-серицитовых метасоматитов и тончайших кварцевых прожилков. Последнее, вероятно, обусловлено внедрением биотитовых гранитов ордовика. Кимканская проба представлена филлитовидными мусковит-графит-кварцевыми сланцами, также метаморфизованными в зеленосланцевой стадии.

По исследованиям первой пробы получены гравитационные и флотационные концентраты, но полное определение выхода и извлечения не получено. Содержание в исходной пробе в пересчете на исходную массу составило по золоту 0,624 г/т, платине 0,44 г/т.

Более полные исследования выполнены на пробе сланцев кимканской толщи, где балансовыми расчетами установлено исходное содержание благородных металлов в графитизированных сланцах: Au – 0,55 г/т; Pt – 0,49 мг/т. Прямое определение из навесок исходной руды: Au – 0,08 г/т (ААС); Pt –0,006 г/т (химико-спектральный анализ V категории точности в лаборатории ОАО «Дальгеофизика»). Гравитационными методами извлекается 79,4 % золота (20,6 % доизвлекается флотацией) и 11,9 % платины (88,1 % доизвлекается только флотацией, связано преимущественно с графитом или находится в ультрадисперсном состоянии). Серебро практически не извлекается.

Изучение хвостов проб под электронным микроскопом показало наличие микровключений золота и платиноидов. Т. е. извлечение неполное и, вероятно, незначительное. Но, показатели по определяемому содержанию благородных металлов и их извлечение стандартными методами близки таковым месторождения «Morro Do Ouro».

В Бразилии на руднике «Morro Do Ouro» успешно извлекают золото из углисто-сульфидных руд [6]. Перерабатываемые руды кварц-серицитовые, углистые, окисленные и малосульфидные. Сульфиды представлены пиритом и, в меньшей мере, пирротином, галенитом, сфалеритом, арсенопиритом, халькопиритом и тетраэдритом. Углистое вещество – сорбционно-активный углерод в виде графита.

Запасы руды 109 млнт со средним содержанием Au 0,55 г/т и 55 млнт с содержанием 0,52 г/т. Действует крупномасштабный комплекс по добыче и переработке руд. Перерабатывается около 10 млнт в год с добычей 4,5–5 т золота. Рудник работает рентабельно на рудах с самым низким содержанием Au в мире 0,6 г/т, которые ниже минимального предела содержания в рудах, подвергаемых кучному выщелачиванию в США.

Схема обогащения гравитационно-флотационная, многоступенчатая. Крупность дробления до –0,02 мм, помола –0,004 мм. На основе процесса Flash-флотации получают концентрат с содержанием Au 300–600 г/т при извлечении 85–86% с доводкой до содержания 400–500 кг/т.

Приведенные результаты исследований показывают, что углеродистые породы кимканской и сутырской толщ Буреинского массива в настоящее время можно рассматривать как бедные золотосодержащие руды с попутной платиноидной минерализацией. Их ресурсы очень большие. Необходимо продолжить исследования как с целью улучшения методов обогащения и извлечения благородных металлов, так и разработки достоверных и сертифицированных методов анализа углеродсодержащих пород и руд. Методы анализа в действующих лабораториях горно-геологической промышленности не дают достоверных данных.

Наши исследования показали, что для обнаружения и переработки углеродистых сланцев, в которых преобладает самородная минерализация (относительно крупные включения), могут быть успешно использованы методы гравитационного и флотационного обогащения. Минерализация, связанная с микровключениями, может быть обнаружена с помощью электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа. Учитывая исключительную устойчивость микровключений к химическому разложению, оценку потенциала этого типа минерализации целесообразно вести с

помощью неразрушающих физических методов анализа. Промышленно рентабельных методов выделения его носителей (обогащения) в настоящее время не существует.

Нам представляется, что изученные углеродистые сланцы являются носителем нового комплексного благороднометалльного оруденения, в настоящее время недостаточно изученного и не вовлеченного в промышленное освоение. Принципиальная новизна этого типа руд заключается в том, что в нем содержится значительное количество благородных металлов в виде химических (композитных?) соединений с кислородом, углеродом и другими элементами и, возможно, входящих в состав графита на наноуровне. Этим он отличается от сходных и хорошо изученных черносланцевых месторождений, содержащих углерод в виде органических соединений и благородные металлы в самородной форме в ассоциации с сульфидами и кварцем (Сухой Лог и др.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Платина России. Проблемы развития минерально-сырьевой базы платиновых металлов в XXI веке (минералогия, генезис, технология, аналитика). М.;ЗАО «Геоинформмарк», 1999, Т.IV. 310 с.
2. *Бердников Н.В., Коновалова Н.С., Зазулина В.Е.* Исследование включений благородных металлов в высокоуглеродистых породах методом РЭМ–РСМА // Тихоокеан. геология. 2010. № 2. С. 90–96.
3. *Ханчук А.И., Бердников Н.В., Черепанов А.А., Коновалова Н.С., Авдеев Д.В.* Первые находки видимых платиноидов в черносланцевых толщах Буреинского массива (Хабаровский край и Еврейская АО) // Доклады РАН, 2009, т. 424, № 5, С. 672–675.
4. *Бердников Н.В., Александрова Т.Н., Коновалова Н.С., Черепанов А.А., Комарова В.С.* Формы выделения благородных металлов в углеродистых сланцах на Дальнем Востоке России//Тектоника, магматизм и геодинамика Востока Азии; VII Косыгинские чтения; материалы Всероссийской конференции, 12–15 сентября 2011, г.Хабаровск – Хабаровск; ИтиГ им. Ю.А.Косыгина ДВО РАН, 2011, С.159–162.
5. *Александрова Т.Н., Черепанов А., Бердников Н.В.* Результаты минералогического и технологического изучения благороднометальной минерализации углеродистых пород сутырской и кимканской толщ Буреинского массива // Проблемы комплексного освоения георесурсов: материалы IV Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых (Хабаровск 27–29 сентября 2011 г.) в 2т. – Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2011. – т.1. С.229–234
6. *Лодейщиков В.В.* Переработка углистых золотых руд на фабрике «Морру Ду Уро» (Бразилия)//Золотодобыча №143, Иргиредмет, Иркутск, 2010. С.6–10.

## ПРИРОДНЫЕ ТИПЫ РУД НА СЕРЕБРЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КИМПИЧЕ (ВЕРХОЯНЬЕ) И ПРОГНОЗ ИХ ОБОГАТИМОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

***Остапенко Л.А.***

ФГУП ЦНИГРИ, г. Москва, lud-ost@mail.ru

Месторождение Кимпиче расположено в северо-западной части Верхоянского складчато-надвигового пояса и локализовано в породах Верхоянского терригенного комплекса [1]. Месторождение является перспективным объектом Верхоянской сереброрудной провинции, обладающей наиболее высоким металлогеническим потенциалом серебра в пределах Российской Федерации. Рудные тела месторождения представлены кварц-сидеритовыми жилами с серебросодержащей блеклорудной минерализацией. Основным полезным компонентом руд является серебро, попутными – медь и сурьма.

Месторождение Кимпиче, как и многие другие серебряные месторождения Северо-Востока России [2], характеризуется наличием мощной зоны окисления, которая местами распространяется на глубину >250 м от современной дневной поверхности (рис. 1), а его руды – высокой интенсивностью развития гипергенных преобразований. Основными факторами, определившими характер развития зоны окисления, являлись: структура месторождения, морфология рудных тел, минеральный состав первичных руд и вмещающих пород. Формирование зоны окисления происходило в три этапа (пенепленизации, эрозии и криогенеза) при многократных циклично-пульсационных сменах Eh- и pH-условий с преобладанием щелочных, без существенного перераспределению рудных элементов [6]. В окисленных рудах установлено более 70 гипергенных минералов, относящихся к различным минеральным классам, для которых характерно непостоянство состава и сложные изоморфные замещения. Большая часть гипергенных минеральных образований представлена полифазными минеральными агрегатами.

Для технологической оценки серебряных руд важны такие параметры минерального состава как общее содержание сульфидов, минеральные формы нахождения серебра и других полезных компонентов, структура руд, физические свойства главных нерудных минералов, гранулометрия промышленных минералов [Амосов и др., 1990 ф]. На поведение руд в технологических процессах и выбор операций для обогащения и переработки руд влияют, также, шламообразующие минералы и компоненты, оказывающие отрицательное воздействие на реагентный режим или окружающую среду – С-орг., мышьяк, селен, ртуть. Окисленные руды составляют значительную часть промышленных запасов и, вследствие существенных отличий от первичных руд по минеральному составу и технологическим свойствам, как правило, выделяются в самостоятельный природный тип, который потенциально может быть выделен в самостоятельный технологический тип.

На месторождении Кимпиче, на основании проведенных исследований было выделено два природных типа руд, отличающихся по степени окисления:

1) первичные (слабо окисленные) руды;
2) окисленные (частично окисленные) руды.

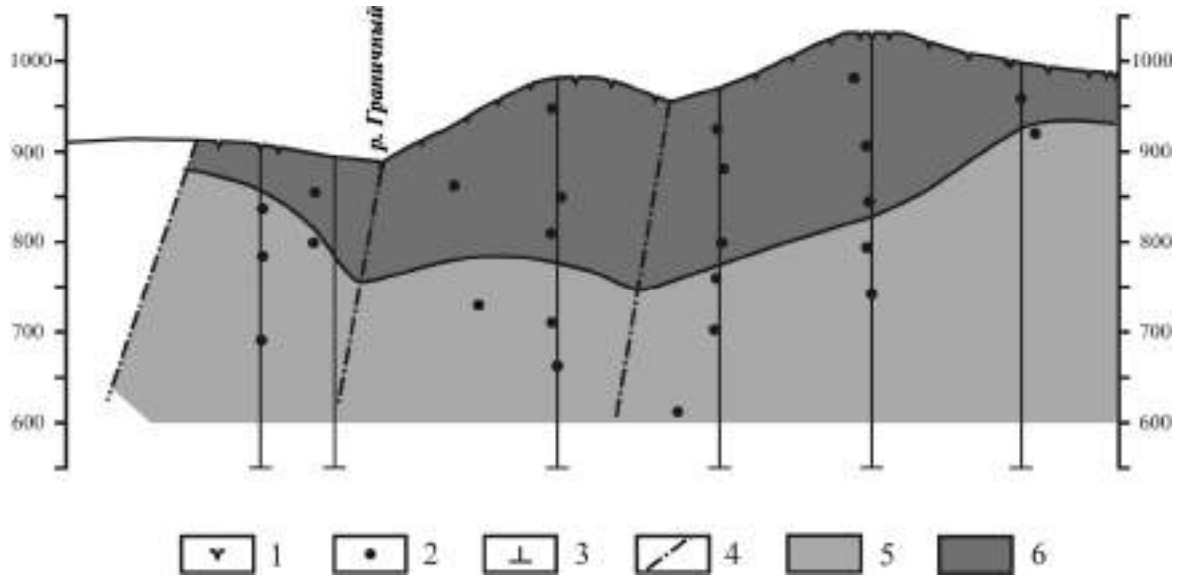



**Рис. 1. Природные типы руд месторождения Кимпиче (фрагмент проекции рудного тела на вертикальную плоскость): 1 – канавы; 2 – след скважины при выходе из рудного тела; 3 – профиль скважин; 4 – предполагаемые разрывные нарушения; 5 – первичные (слабо окисленные) руды; 6 – окисленные (частично окисленные) руды**

Для распознавания первичных и окисленных, или окисленных в разной степени руд, используют их окраску, текстуру и структуру, содержание визуально диагностируемых вторичных минералов, индикаторные отношения химических элементов (табл. 1). Наиболее удобными для распознавания природных типов руд являются индикаторные отношения [5]. При определении геохимических критериев для оконтуривания зоны гипергенеза данного месторождения, где при изменении руд месторождения окисляется, прежде всего, сидерит, который к тому же резко преобладает над остальными минералами, логично воспользоваться отношением $K_{Fe} = Fe_2O_3/FeO$. Это отношение в рудах сходного минерального состава является наиболее чувствительным индикатором степени окисления, так как оно варьирует в широком диапазоне и изменение его в пространстве подтверждает характер гипергенной зональности [5]. В качестве граничного значения при оконтуривании окисленных (частично окисленных) руд (рис. 2) выбрано значение $K_{Fe}$=2, при котором окисление сидерита >65 %, а степень окисления блеклой руды >15 %. В качестве дополнительного критерия может использоваться значение содержания в руде $CO_2$ (см. табл. 1), хотя он в интервале перекрытия значений (5–12 %) не однозначен.

Таблица 1. Критерии для выделения природных типов руд месторождения Кимпиче

| Критерии | | Природные типы руд | |
|---|---|---|---|
| | | Первичный (слабо окисленный) | Окисленный (частично окисленный) |
| Визуальные | Цвет жильно-прожилковых образований | Светло-зеленовато-кремовый, светло-коричневый, бурый (неравномерной интенсивности) | Темно-бурый, красно-бурый, темно-коричневый |
| | Текстура жильно-прожилковых агрегатов | Прожилково-вкрапленная | Прожилково-вкрапленная, скелетно-кавернозная, рыхлая |
| | Наличие легко диагностируемых гипергенных минералов меди | Отсутствуют | Малахит, азурит |
| Оптические | Степень окисления сидерита | <65 % | >65 % |
| | Степень окисления блеклой руды | <15 % | >15 % |
| Геохимические | Содержание $CO_2$ | >5 % | <12 % |
| | $K_{Fe} = Fe_2O_3/FeO$ | <2 | >2 |

Руды месторождения Кимпиче относятся к серебро-сурьмяному геохимическому типу, Они характеризуются весьма сложным минеральным составом (диагностировано более 80 минералов), при этом большинство определенных минеральных фаз (>70) имеет гипергенный генезис. В то же время, первичные руды по набору главных минералов чрезвычайно просты – это кварц-сидеритовые жилы с серебросодержащей блеклой рудой. В контур рудных тел попадают как кварц-сидеритовые прожилки с блеклорудной минерализацией, так и вмещающие породы из меж-жильно-прожилкового пространства и в виде обломков в жилах брекчиевой текстуры. Поэтому химический и минеральный состав руд обусловлен как составом жильных агрегатов, основными минералами в которых являются сидерит, кварц, блеклая руда и гипергенные минералы, образовавшиеся по ним в зоне окисления, так и составом вмещающих пород, основными слагающими минералами которых являются кварц, полевые шпаты, серицит, гидрослюды, хлорит и часть карбонатов.

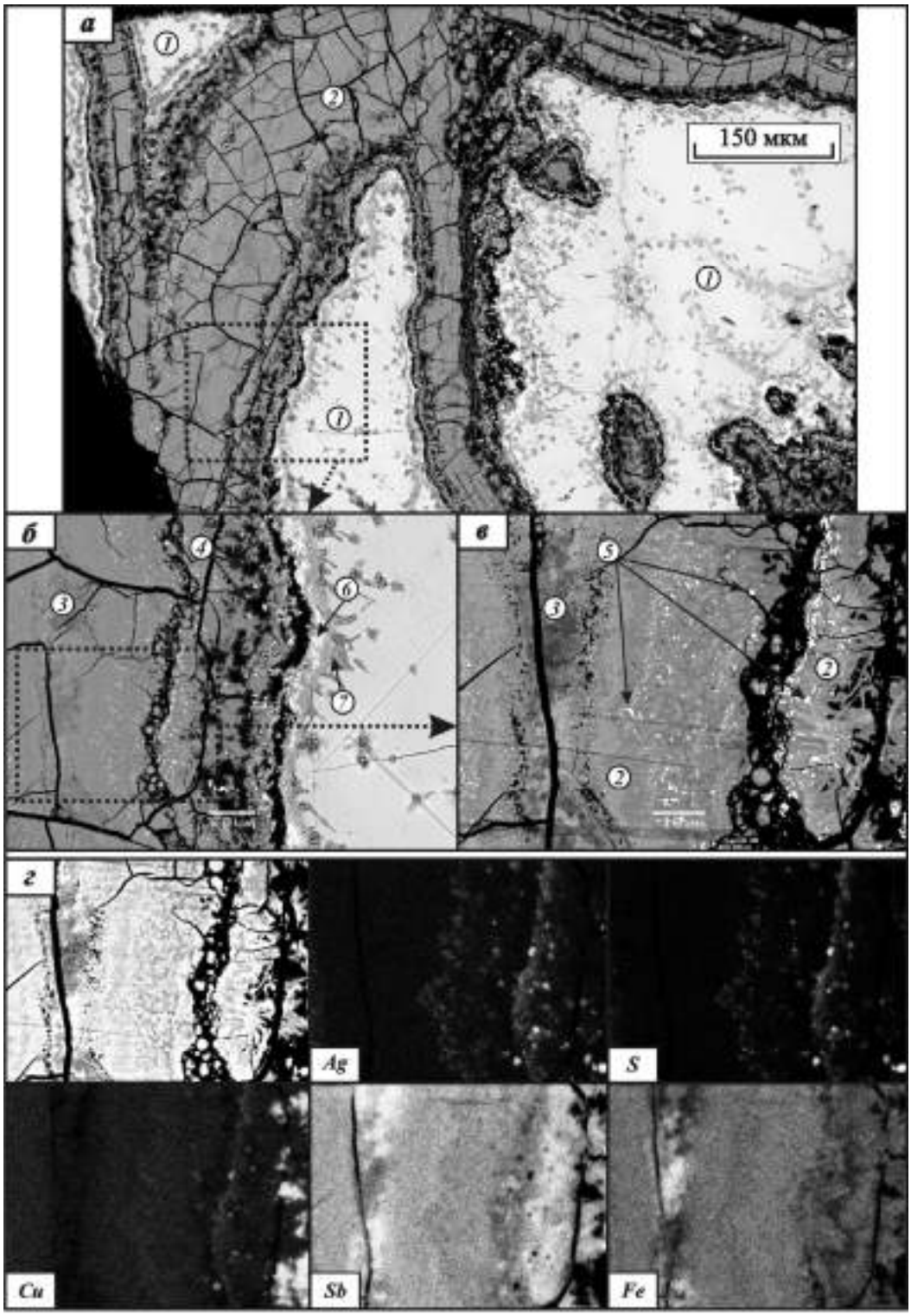



**Рис. 2. Строение зональных гипергенных агрегатов, замещающих тетраэдрит (а – общий вид; б, в – фрагменты; г – фото в характеристических излучениях), монтированный аншлиф, фото в отраженных электронах (съемка проведена В.О.Япаскуртом, МГУ): 1 – тетраэдрит; 2 – полифазный агрегат с преобладанием оксидов сурьмы; 3 – агрегат гидрогетита с оксидами сурьмы; 4 – спертиниит; 5 – Cu-акантит; 6 – Sb-балканит; Ag-борнит**

Химический состав руд месторождения Кимпиче, определенный комплексом аналитических методов в отделе аналитических исследований ФГУП ЦНИГРИ (атомно-абсорбционным, титриметрическим, фотометрическим, гравиметрическим, газообъемным и масс-спектрометрическим анализом с индуктивно связанной плазмой), характеризуется резким преобладанием в их составе Fe и $CO_2$, содержание которых в сумме в среднем составляет ~30 %, а с учетом оксидных форм Fe – ~50 %. Содержания в рудах Si, Al, Mg, K, Ca и Mn находятся в резко подчиненных количествах (в среднем – 0,39–2,31 %). Обращает на себя внимание повышенные содержания $C_{орг.}$ (в среднем – 0,77 %) и заметная гидратированность руд (содержания $H_2O$ до 3,1 %, в среднем – 1,13 %), а также крайне низкие содержания Na (22 – 735 г/т, в среднем – 227 г/т). Основные полезные компоненты руд месторождения – серебро, медь и сурьма, среднее содержание которых в изученных пробах составляет 0,19, 1,25, 0,77 %, соответственно. Окисленные (частично окисленные) руды характеризуются, в сравнении с первичными рудами, более низкими содержаниями $CO_2$ и Mg, а также существенным преобладанием трехвалентного железа над двухвалентным.

При изучении минерального состава руд месторождения, помимо большого объема визуальных и микроскопических наблюдений, был использован широкий комплекс инструментальных методов исследования: рентгенографический фазовый анализ на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3; ИК-спектроскопия на приборе Nicolet-380 с микроскопом Centaurus и приставкой Smart Diffuse Reflectance (ФГУП ЦНИГРИ, Хачатрян Г.К.); оже-электронная спектроскопия на установке LAS-3000 фирмы RIBER (ФГУП ЦНИГРИ, Щегольков Ю.В.); рентгеноспектральный локальный микроанализ на микроанализаторе SX100 фирмы Cameca (ГЕОХИ РАН, Кононкова Н.Н.); сканирующая электронная микроскопия на установке «Jeol JSM-6480LV» с энергодисперсионным спектрометром «INCA-Energy 350» (МГУ, Япаскурт В.О.).

Основным жильным минералом руд является сидерит, кварц присутствует в подчиненном количестве, а карбонаты доломит-анкеритового ряда – редки. Большая часть полевых шпатов, слюд и хлорита, совместно с некоторой долей кварца, как уже отмечалось выше, характеризует в пробах количество обломков вмещающих пород. Основными гипогенными рудными минералами являются блеклые руды (тетраэдрит и фрейбергит), содержания которых в исследованных пробах иногда достигают 10–15 %, в среднем составляя 1–2 %. Халькопирит, пирит, арсенопирит, галенит и сфалерит присутствуют в резко подчиненных количествах, иногда спорадически формируя значительные по объему скопления.

Среди гипергенных минералов преобладают оксиды и гидроксиды Fe, составляющие >90 % объемов гипергенных агрегатов, причем на 90–95 % – это оксиды и гидроксиды Fe, заместившие сидерит. Содержания их в пробах иногда составляют до 90 %, а в среднем не менее 40–50 %. Гипергенные карбонаты Mg и Ca, а также сульфаты присутствуют в рудах в подчиненных количествах. В составе гипергенных агрегатов, образующихся за счет окисления рудных гипогенных минералов, наибольшим распространением пользуются оксиды (гидроксиды) и карбонаты меди, оксиды и гидроксиды сурьмы. В несколько меньших количествах присутствуют арсенаты и оксиды As. Сульфиды и сульфосоли Ag и Cu, а также самородное Ag составляют в среднем не более 3–5 % таких агрегатов.

В изученных пробах первичных (слабо окисленных) руд степень окисления сидерита <65 % и, в среднем, не превышает 20–30 %. Степень окисления блеклой руды– <15 %, и, в среднем, составляет 5–7 %. Степень окисления сидерита в рудах окисленного (частично окисленного) природного типа >65 % и часто достигает 100 %. Степень окисления рудных минералов – >15 %, и, в среднем, составляет 30–40 %.

Содержания гипергенных минералов в рудах первого типа в среднем составляет 20–25 %, с резким преобладанием (>95 отн.%) оксидов и гидроксидов Fe, образовавшихся при окислении сидерита. При этом гипергенные агрегаты, возникшие при окислении блеклых руд, характеризуются существенно большей долей в своем объеме (по сравнению с окисленными рудами) гипергенных сульфидов и сульфосолей.

Общее содержание гипергенных агрегатов в рудах окисленного (частично окисленного) природного типа местами превышает 95–97 %, и в среднем составляет не менее 50–60 %. В гипергенных агрегатах практически постоянно фиксируются малахит и азурит. В агрегатах, сформировавшихся непосредственно при окислении блеклых руд преобладают оксиды и гидроксиды Cu и Sb, а доля гипергенных сульфидов, сульфосолей и самородного Ag редко превышает 3–5 %.

Окисленные руды, преимущественно, существенно отличаются от первичных по минеральным формам нахождения серебра и других полезных и вредных компонентов [Амосов и др., 1990 ф]. Основными полезными компонентами руды, как уже отмечалось выше, являются серебро, медь и сурьма. К вредным примесям, которые являются традиционными для серебряных руд большинства месторождений, можно отнести мышьяк и ртуть. Установление всех минеральных форм нахождения полезных и вредных компонентов является одной из основных задач при прогнозировании технологических свойств руд.

В первичных рудах месторождения Кимпиче основным концентратором полезных и большинства вредных компонентов являются блеклые руды (тетраэдрит и фрейбергит). В гипергенных агрегатах формы нахождения, представляющих интерес элементов, весьма разнообразны. Эти элементы образуют, как собственные минеральные фазы, так и входят в состав других минералов в виде примесей. При этом, большинство минералов, как и блеклые руды, являются общими для нескольких компонентов. Для индивидуальных фаз характерно непостоянство состава и сложные изоморфные замещения, при этом большинство минералов в гипергенных агрегатах представлены микроскопическими выделениями, образующими друг с другом сложные срастания и механически непрочны.

Таблица 2. Баланс распределения полезных компонентов в рудах месторождения Кимпиче

| Минеральный агрегат | Ag | | Cu | | Sb | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Минеральные формы | Распределение, отн. % | Минеральные формы | Распределение, отн.% | Минеральные формы | Распределение, отн. % |
| гипо-генный | Блеклая руда | > 99 | Блеклая руда | > 95 | Блеклая руда | 100 |
| | Галенит | < 1 | Халькопирит | < 5 | | |
| гипер-генный | Акантит | 60–70 | Спертиниит и другие оксиды Cu | 40–45 | Оксиды и гидрооксиды Sb | 85–90 |
| | Штромейерит | 20–30 | Карбонаты Cu (малахит азурит) | 30–40 | Сульфиды и сульфосоли Ag и Cu | 5–10 |
| | Самородное Ag | 5–10 | Сульфиды и сульфосоли Ag и Cu | 5–10 | Оксиды и гидрооксиды Fe | 1–2 |
| | Прочие сульфиды и сульфосоли Ag | 3–5 | Гидроксиды Sb | 3–5 | Прочие гипергенные агрегаты | 3–5 |
| | Сульфиды Cu | <1 | Самородная Cu | << 1 | | |
| | Кераргирит | < 1 | Оксиды и гидрооксиды Fe | 3–5 | | |
| | Карбонаты Cu (малахит, азурит) | 1 | Прочие гипергенные агрегаты | 1–2 | | |
| | Гипергенные оксидные и сульфатные агрегаты | 1–2 | | | | |

***Серебро*** в гипогенных минеральных агрегатах преимущественно сконцентрировано в блеклых рудах (табл. 2). Среднее содержание Ag в тетраэдрите, по данным локального рентгеноспектрального микроанализа, составляет около 5 %, а во фрейбергите – около 50 %. Незначительная его доля (<1 %) в рудах месторождения связана с галенитом. Содержания Ag в галените, по данным рентгеноспектрального микроанализа, меняется в пределах от 0 до 0,49 %, а по данным атомно–абсорбционного анализа – от 200 до 500 г/т.

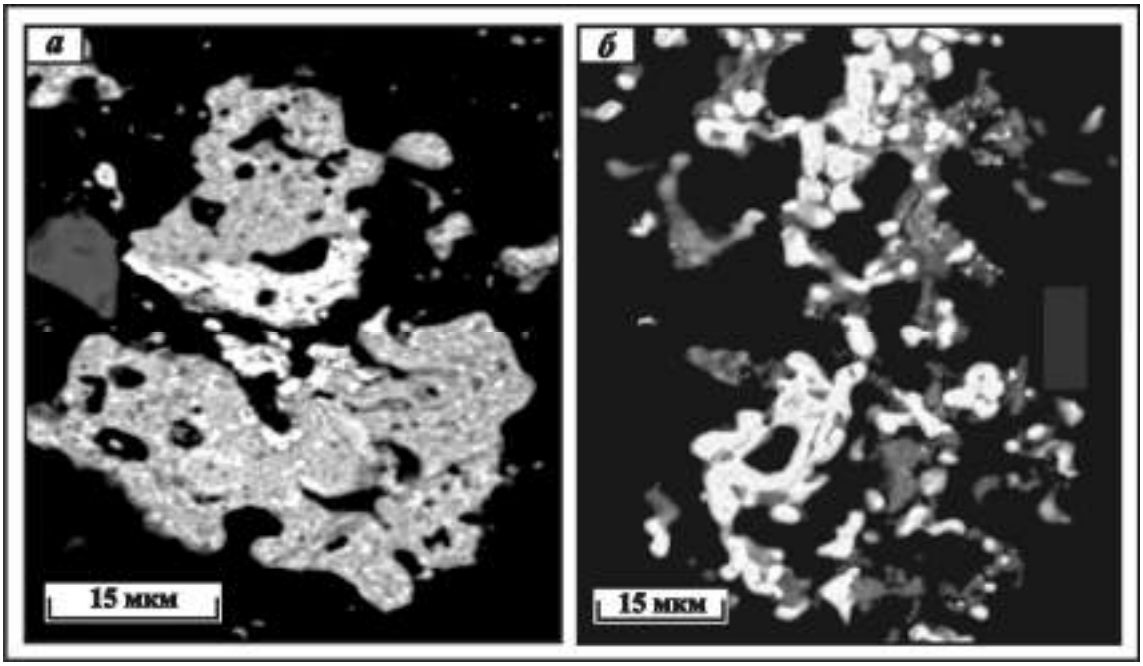



**Рис. 3. Морфология выделений гипергенных агрегатов акантита, монтированные аншлифы, фото в отраженных электронах: а – комковидное скопление неоднородного по составу агрегата Cu-акантита (содержания Cu – 2–10 мас.%, в светлых участках содержания Cu ниже); б – каркасный агрегат мелких, удлиненных кристаллов Cu-акантита (белое) с оксидом Sb (св. серое)**

Главными концентраторами тонко-вкрапленного акантита в таких образованиях являются агрегаты, в составе которых преобладают сложные оксиды и гидроксиды сурьмы стибиконитовой группы (рис.2). Содержания серебра в таких ритмах зональных агрегатов по данным локальных анализов составляет до 10–15 %. В отдельных ритмах агрегатов других составов, развивающихся по блеклым рудам, содержания серебра (в пересчете на оксид) по данным локальных анализов часто не фиксируются, или составляют от сотых до десятых долей процента, редко – первые проценты. Суммарно, по данным атомно-абсорбционного анализа, содержания серебра в гипергенных агрегатах, замещающих блеклые руды, сопоставимы с содержаниями в замещаемом минерале. Кроме этого, серебро в виде изоморфной примеси (до 14 %) входит в состав гипергенных сульфидов меди ковеллин-халькозинового ряда и борнита. В «перемещенных» гипергенных агрегатах выполнения, из-за слабой миграционной активности серебра в зоне окисления данного месторождения [6], содержания серебра, по данным атомно-абсорбционного анализа, близки фоновым, редко достигая первых г/т. И только в карбонатах меди, отобранных в непосредственной близости от выделений окисляемой блеклой руды, содержания серебра иногда достигают n x 10 г/т.

Достаточно часто в окисленных рудах встречается самородное Ag в виде, как мелких, так и достаточно крупных (до 1–2 мм), комковатых выделений, в срезе определяемых как сростки

достаточно хорошо ограненных кристаллов, или трещинных образований. Состав самородного Ag характеризуется повышенными содержаниями элементов-примесей. На поверхности самородного Ag иногда фиксируются «корочки» кераргирита – AgCl,

Таким образом, основными концентраторами серебра в окисленных рудах месторождения Кимпиче являются гипергенные сульфиды и сульфосоли, а также самородное серебро, на долю которых в общем балансе распределения серебра приходится ~95 отн.% (табл. 2).

***Медь*** в гипогенных рудах преимущественно связана с блеклыми рудами, при средних содержаниях в тетраэдрите ~35 %, а во фрейбергите – ~4 %. Доля меди в балансе распределения, приходящаяся на халькопирит составляет <5 % (табл. 2).

Список собственных гипергенных медных минералов очень обширен и представлен оксидами (гидроксидами), карбонатами, сульфидами и сульфосолями, а также самородной Cu. Среди сульфидов и сульфосолей установлены: ковеллин – CuS, халькозин – $Cu_2S$, борнит – $Cu_5FeS_4$, кубанит – $CuFe_2S_3$, лаутит – CuAsS, штромейерит – AgCuS, ялпаит – $Ag_3CuS_2$, балканит – $Cu_9Ag_5HgS_8$ и пирсеит – $(Ag,Cu)_{16}As_2S_{12}$. Преимущественно, они формируют первые (ближние к не затронутым преобразованиями участкам) каймы замещения блеклой руды (рис. 2, рис. 4-в) и характеризуются повышенными содержаниями примесей.

Кабонаты представлены широко распространенными на месторождении малахитом – $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ и азуритом – $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$, которые, преимущественно, встречаются во взаимном срастании (рис. 4-б), или в пространственной ассоциации, друг с другом. Карбонаты меди развиваются по трещинам в окисленных сидеритовых жилах и прожилках (рис. 4-б, г), в кварцево-жильных агрегатах и во вмещающих породах на незначительном удалении от рудных тел. Отмечаются тонкие Cu-карбонатные сетчатые микропрожилки, образовавшиеся по трещинам усыхания в полиминеральных гипергенных агрегатах, заместивших блеклую руду при окислении, а также поздние секущие такие агрегаты прожилки выполнения (рис. 4-в-6). Для их состава характерно наличие примеси Fe и Ca, а также постоянно фиксируется примесь Zn (0,12–0,9 мас.%).

Оксиды (гидроксиды) меди представлены спертиниитом – $Cu(OH)_2$, делафоситом – $CuFeO_2$, партцитом – $Cu_2Sb_2(O,OH)_7$, теноритом – CuO и купритом – $Cu_2O$, из которых последние два встречены в виде единичных минералогических находок. Партцит присутствует в составе полифазных гипергенных агрегатов, с преобладанием сложных оксидов сурьмы, замещающих блеклые руды. Делафосит – сложный оксид, в составе которого основными элементами являются 1-валентная медь и 3-валентное железо. Он формирует пластинчатые, сноповидные, радиально-лучистые агрегаты, преимущественно в ассоциации с гидрогетитом (рис. 4-а), а иногда с переотложенными оксидами сурьмы. В такой ситуации сурьма в его составе присутствует в виде примеси. Спертиниит отмечался в виде отдельных ритмов в составе зональных кайм вокруг блеклой руды, где часто формирует парагенные агрегаты с оксидами сурьмы, или в виде микропрожилков, телескопирующих вдоль трещин более ранние полифазные гипергенные агрегаты с преобладанием оксидов сурьмы (рис. 2-в-1). В спертиниите иногда отмечается мелкая (преимущественно <1 мкм) вкрапленность достаточно хорошо ограненных кристаллов переотложенного акантита. Состав его характеризуется наличием примесей Sb, As, Zn (0–1,33 мас.%), а также повышенными (до 11,75 мас.%) содержаниями Fe (в пересчете на оксиды). Считается, что между спертиниитом и амакинитом (FeOH) существует непрерывный изоморфный ряд [2]. В составе амакинита на данном месторождении содержания меди также значительны (7,5 – 11,3 мас.%).

В балансе распределения меди, как ее концентраторы, доминируют оксиды и гидроксиды, преимущественно спертиниит, и карбонаты (табл. 2). Несколько меньшее количество меди связано с гипергенными сульфидами и сульфосолями, а также со сложными оксидами и гидрооксидами сурьмы, в том числе, и в виде совместной медно-сурьмяной минеральной фазы партцита. Вследствие достаточно высокой подвижности меди в зоне окисления месторождения, содержания меди в виде изоморфной примеси фиксируются и в других гипергенных минералах, но доля ее в таких агрегатах в общем балансе распределения не превышает 5–7 %. Самородная медь отмечается в рудах как минералогическая находка.

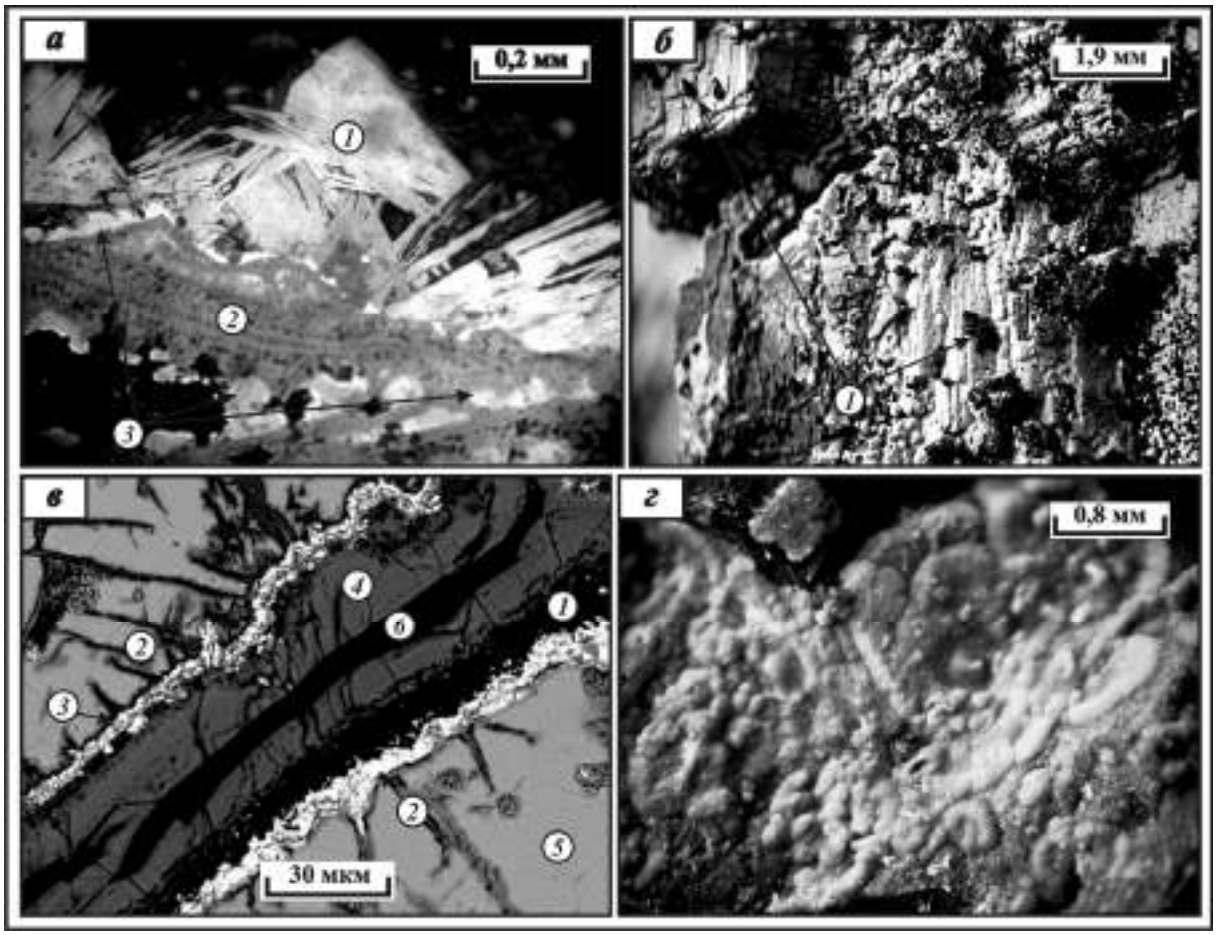



**Рис. 4. Морфология выделений гипергенных медных минералов: а – сноповидные выделения делафосита (1) по границе полости выщелачивания, заполненной переотложенным зональным гидрогематит(2)-гидрогетитовым(3) агрегатом, аншлиф, фото в отраженном свете, николи II; б – корочки малахита (светлое) с удлиненными кристаллами азурита (1) на окисленном сидерите (темное), фото образца под бинокуляром; в – телескопирование спертиниитом (1) зонального гипергенного агрегата (2 – штромейерит, 3 – Ag-халькозин, 4 – полифазный агрегат с преобладанием оксидов Sb), развивающегося по тетраэдриту (5), и развитие азурита (6) по трещинам усыхания в нем , монтированный аншлиф, фото в отраженных электронах; г – колломорфные выделения малахита, фото образца под бинокуляром**

***Сурьма*** в гипогенных рудах, в отличие от серебра и меди, связана только с блеклыми рудами, средние содержания ее в которых >20 %. Она присутствует в виде примеси (0,06–0,94 %) в составе галенита и сфалерита позднего парагенезиса, но доля сурьмы, приходящаяся на них в общем балансе распределения крайне незначительна, и может не учитываться.

По количеству диагностированных собственных гипергенных минералов сурьма не намного уступает меди и в рудах месторождения они представлены оксидами (гидроксидами) и сульфосолями. Сульфосоли являются общими формами нахождения с Ag и Cu. Это стефанит – $Ag_5SbS_4$, полиаргирит – $Ag_{24}Sb_2S_{15}$ и пиростильпнит – $Ag_3SbS_3$.

Оксиды Sb широко развиты в зонах окисления месторождений с сурьмяной первичной минерализацией, к которой относится и основной рудный минерал исследуемого месторождения – блеклая руда. При этом, обычно, прежде всего, образуются [9] простые оксиды и гидроксиды сурьмы сенармонтит – $Sb_2O_3$, валентинит – $Sb_2O_3$ и стибиконит – $Sb_3O_6(OH)$, которые в данном случае были зафиксированы только по данным рентгено-фазового анализа в составе полифазных

гипергенных агрегатов. По данным локальных рентгеноспектрального анализа и энергодисперсионной спектроскопии, которые практически полностью совпали, оксиды сурьмы, в основном, представлены сложными минералами группы стибиконита (партцитом, ромеитом, трипугитом и флайолотитом) и их гидратированными разностями. Минералы данной группы плохо изучены [2], и по данным различных авторов для них приводятся разные кристаллохимические формулы (табл. 3). Данные локальных анализов состава оксидов сурьмы только в единичных случаях могли быть пересчитаны на кристаллохимические формулы. Так, например, натровый аналог гидроромеита определен в секущих микропрожилках, развившихся по более раннему гипергенному агрегату, заместившему блеклую руду (рис. 5-а), а также в полости выщелачивания в гидрогетите, заместившем сидерит (рис. 5-б). Данные всех остальных локальных анализов с высокими содержаниями сурьмы в более чем 20 точках определения, скорее всего, соответствуют составу полифазных минеральных агрегатов и интерпретация их может быть только предположительной. Неоднородность анализируемых агрегатов была подтверждена при исследовании образцов на сканирующем электронном микроскопе, где при больших увеличениях стало видно, что исследуемые агрегаты крайне неоднородны (рис. 2-в), а большинство выделений, которые можно определить, как мономинеральные, имеют размер <1–3 мкм. Размер же пучка электронов при локальном анализе не менее 2–3 мкм, что делает крайне сложным возможность получить анализ состава, соответствующий отдельной минеральной фазе.

Таблица 3. Кристаллохимические формулы сложных оксидов сурьмы стибиконитовой группы

| Минерал | Кристаллохимическая формула по данным различных авторов | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Смолянинов, 1972 [7] | Минерало-гические таблицы, 1981 [3] | Штрюбель, Циммер, 1987 [8] | Яхонтова, Грудев, 1987 [9] | Двуреченская, 2001 [2] |
| Стибиконит | $Sb_3O_6(OH)$ | $SbSb_2O_6(OH)$ | $Sb_3O_6(OH)$ | $Sb_2O_4xH_2O$ | |
| Ромеит | $(Ca,Na,Mn)_2Sb_2O_6(F,OH,O)$ | $CaSb_2O_7$ | $(Ca,Fe,Mn,Na)_2(Sb,Ti)_2O_6(O,OH,F)$ | | |
| Гидроромеит | $Ca_2Sb_2O_6x3$-$4H_2O$-? | $CaSb_2O_6x3H_2O$ | | | |
| Шнеебергит | $(Ca,Na,Fe)_2Sb_2O_6(F,OH,O)$ | | синоним ромеита | | |
| Трипугит | $Fe^{+2}{}_2Sb_2O_7$ | $FeSb_2O_6$ | $FeSb_2O_3$ | $FeSb_2O_3$ | |
| Флайолотит | $4Fe^{+3}SbO_4x3H_2O$ | | | $Fe^{+3}[Sb^{+5}O_4]x0,7H_2O$ | |
| Партцит | | | $Cu_2Sb_2(O,OH)_7$ | $Cu_2Sb_2O_6$ | $(Cu,Fe)_2(Sb,As)_2(O,OH)_7$ |
| Монимолит | | $Pb_2(Sb,Fe)_2O_7$ | свинцовый ромеит | | $(Fe,Cu,Zn,Pb,Ca)_3(Sb,As)_2O_8$ (условно) |

В балансе распределения сурьмы в гипергенных агрегатах резко доминируют сложные оксиды и гидроксиды сурьмы стибиконитовой группы (табл. 2). Существенно меньшая ее доля приходится на гипергенные сульфиды и сульфосоли, а в виду ее слабой подвижности в зоне окисления месторождения доля сурьмы, приходящаяся на изоморфные примеси в других гипергенных минералах, не превышает 5–7 %.

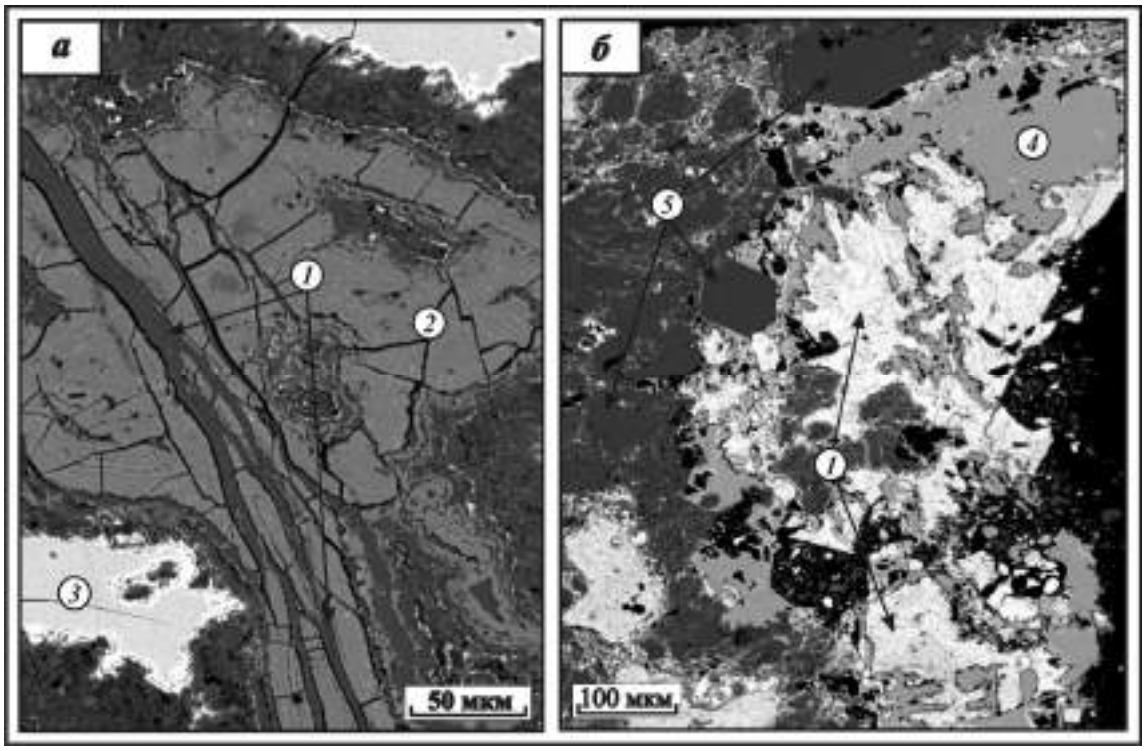



**Рис. 5. Характер выделений гидроромеита (1), монтированные аншлифы, фото в отраженных электронах: а – микропрожилки Na-аналога гидроромеита, секущие более ранний зональный гипергенный агрегат (2) с преобладанием оксидов сурьмы, заместивший тетраэдрит (3); б – выполнение полостей выщелачивания Na-аналогом гидроромеита в гидрогетите (4), заместившем сидерит в кварц (5)-сидеритовом жильном агрегате**

***Мышьяк*** в гипогенных образованиях концентрируется в виде примеси (0,9–7,52 %) в блеклых рудах и в собственной минеральной фазе – арсенопирите, который в большей степени представлен вкрапленностью во вмещающих породах, чем входит в состав жильно-прожилковых агрегатов. В зоне окисления месторождения мышьяк обладает достаточно высокой подвижностью и фиксируется в виде собственных минеральных фаз и изоморфных примесей в составе гипергенных минералов и агрегатов как в жильно-прожилковых образованиях, так и за их пределами. Основными концентратороами мышьяка является арсенаты, среди которых чаще встречается скородит – $Fe(AsO_4)x2H_2O$. Значительная доля мышьяка приходится на фармакосидерит – $Fe_5(AsO_4)(OH)_6x6H_2O$. Редко инструментальными методами фиксируются симплезит – $Fe_3(AsO_4)_2x8H_2O$ и оксиды As арсенолит – $As_2O_3$ и клаудетит – $As_2O_3$. Преимущественно, гипергенные минералы As установлены в составе полиминеральных агрегатов, содержания мышьяка в которых варьируют от 0 до 15 %, в среднем, вероятно, составляя не менее 3–5 % (в пересчете на оксид). Только фармакосидерит формирует мономинеральные обособления щеточек кубических кристаллов, или почковидных выделений, в трещинах жильных агрегатов, часто в ассоциации с азуритом.

***Ртуть***, как и все полезные и вредные компоненты, в гипогенных агрегатах концентрируется в блеклых рудах, входя в их состав в виде изоморфной примеси с содержаниями от 0 до 1,29 %. Среди гипергенных образований на данном этапе исследований установлена только одна собственная ртутная минеральная фаза – Sb–балканит – $Cu_9Ag_5HgS_8$ (рис. 2-б-6). При этом, очень высокие содержания ртути (до 15 %) установлены в полифазных гипергенных агрегатах с богатой серебряной минерализацией, а также, в виде изоморфной примеси ртуть, практически постоянно, входит в состав самородного Ag (до 1 %), и, иногда, в состав гипергенных сульфидов и сульфосолей (до 3,88 %). В полифазных оксидных гипергенных агрегатах ртуть не зафиксирована.

Основным способом обогащения руд данного типа является флотационный [Двуреченская, Макаров и др., 1991 ф; Ивановская и др., 2008 ф]. В связи с этим, при изучении вещественного состава руд, помимо установления минеральных форм компонентов важным является и изучение состава поверхности рудных минералов, который определяет их флотационную активность. На анализаторе поверхности ЛАС-3000 методом оже-спектроскопии был изучен состав поверхности, покрытой тонкими новообразованными пленками, а для сравнения – состав поверхности свежих сколов зерен блеклой руды. Проведенные исследования выявили существенные отличия состава поверхности образцов от состава их свежего скола (табл. 4). Это может оказывать значительное влияние на флотационную активность блеклых руд, так как основным химическим элементом в составе поверхностных образований является кислород, что свидетельствует об оксидных (гидроксидных) формах нахождения установленных элементов.

Таблица 4. Состав фаз на поверхности блеклой руды и поверхности свежих сколов по данным электронной оже-спектроскопии

| № образ-ца | № точ-ки | Тип анали-зируемой поверхности | Содержание элемента (атомные концентрации, %) | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ag | Fe | S | Cl | Sb | Ca | K | Cu | O | C |
| 1 | 1 | поверхностное образование | | 15,5 | | | 13,7 | 6,9 | 1,8 | | 44,4 | 17,7 |
| | 2 | поверхностное образование | 0,9 | 9,6 | 5,5 | 19,2 | 3,2 | 7,5 | 1,7 | 12,1 | 11,2 | 29,4 |
| | 3 | поверхностное образование | | 24,9 | | | | | | | 31,7 | 43,4 |
| | 4 | свежий скол | 1,7 | | 29,5 | | 11,3 | | | 22,8 | | 34,7 |
| 2 | 1 | поверхностное образование | | | 4,1 | | 13,6 | | | | 44,3 | 38 |
| | 2 | свежий скол | 2,3 | | 29 | | 8 | | | 21,6 | | 39,1 |

Таким образом, исходя из приведенной характеристики вещественного состава руд, а также изучения состава поверхности основного гипогенного рудного минерала, блеклой руды, можно предположить, что существенное влияние на показатели обогащения гетит-сидеритовых руд будет оказывать режим их измельчения. Общей особенностью окисленных руд является их низкая механическая устойчивость из-за рыхлых мелкозернистых сложных по составу гипергенных агрегатов, которые часто составляют существенную долю их объема. Это, а также то, что значительная доля полезных компонентов находится в агрегатах гипергенных минералов, образующих плотные каймы вокруг блеклой руды, которые при измельчении остаются с ней в сростках и извлекаются во флотационный концентрат, не допускает переизмельчения руды. С другой стороны, большинство зерен блеклой руды имеет на поверхности тонкие оксидные пленки, подавляющие флотационную активность, что требует доизмельчения крупных классов для улучшения раскрытия и получения “свежих” сколов на поверхности зерен.

Не все окисленные серебряные руды являются труднообогатимыми, хотя гипергенные преобразования всегда оказывают то, или иное влияние на их технологические свойства. Выявление технологически значимых параметров качества руд, а также установление возможных закономерностей между технологическими параметрами руд и особенностями их вещественного состава возможны после отнесения изучаемых окисленных серебряных руд к одной из минеральных разновидностей [4]. Руды месторождения Кимпиче относятся к гетит-сидеритовой минеральной разновидности, типичным представителем которой также являются окисленные руды эталонного месторождения Асгат, относящегося к серебро-сурьмяному геохимическому типу.

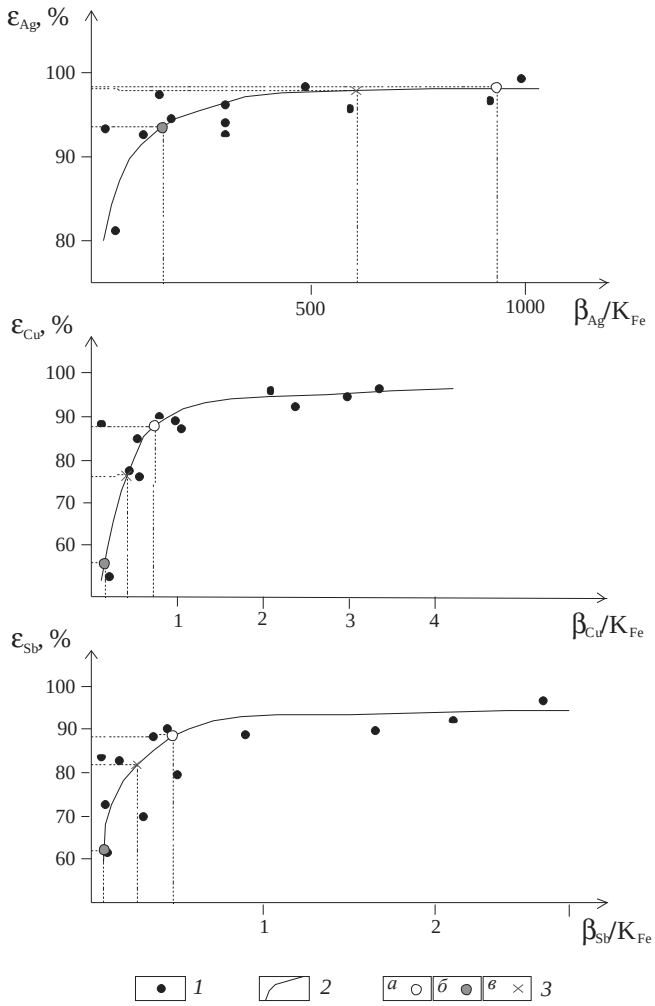



**Рис. 6. Определение возможного извлечений полезных компонентов из руд месторождения Кимпиче по графикам зависимости извлечения элементов в концентрат (ε) от их содержания в исходной руде (β) с учетом интенсивности окисления (KFe) для руд эталонного месторождения Асгат: 1 – показатели извлечения полезных компонентов из малых технологических и лабораторных проб руд месторождения Асгат; 2 – результирующие кривые извлечений; 3 – возможные извлечения компонентов из руд месторождения Кимпиче (а – первичных, б – окисленных, в – среднее по месторождению)**

Для руд месторождения Асгат [4] при проведении минералого-технологического картирования по показателям обогащения малых технологических и лабораторных проб были построены графики зависимости извлечения полезных компонентов от комплексного параметра $\beta_{Me}/K_{Fe}$ (рис. 6), характеризующего содержание Ag, Cu, Sb ($\beta_{Me}$) и степень окисления руды $K_{Fe}=Fe_2O_3/FeO$. Отклонения точек реальных значений от полученной кривой не существенны, поэтому она может использоваться для прогноза извлечения металлов в концентрат из руд месторождения с большой степенью вероятности. Руды месторождения Кимпиче очень близки по химическому и минеральному составу рудам месторождения Асгат, относятся к тому же серебро-сурьмяному геохимическому типу, а окисленные руды – к той же гетит-сидеритовой минеральной разновидности, что позволяет использовать данные кривые для определения возможного извлечения металлов (рис. 6). Полученные расчетные показатели позволяют предположить, что извлечение серебра из всех природных типов руд месторождения Кимпиче составит >90 %, а извлечение меди и сурьмы из первичных и окисленных руд будет существенно отличаться. Из первичных руд их извлечение составит ~90 %, а из окисленных только ~60 % (табл. 5).

Таблица 5. Расчетные параметры извлечения металлов из руд месторождения Кимпиче ($\beta_{Me}$ – среднее значение содержания металла в руде; $K_{Fe} = Fe_2O_3 / FeO$)

| Природный тип руды | $\beta_{Me}$ / $K_{Fe}$ | | | Возможное извлечение металла ($\varepsilon_{Me}$), отн.% | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***Ag*** | ***Cu*** | ***Sb*** | ***Ag*** | ***Cu*** | ***Sb*** |
| Первичный (слабо окисленный) | 933 | 0,72 | 0,47 | 98 | 88 | 89 |
| Окисленный (частично окисленный) | 159 | 0,11 | 0,06 | 97 | 57 | 62 |
| Суммарно | 598 | 0,40 | 0,25 | 94 | 76 | 82 |

При проведении в отделе обогащения ФГУП ЦНИГРИ технологических испытаний, с разработкой оптимальных схем обогащения, двух технологических проб руд месторождения Кимпиче [Ивановская и др., 2008 ф], характеризующие оба выделенные природные типа, были получены следующие показатели извлечения металлов из первичных и окисленных руд: Ag – 97,9 и 94,9 отн.%; Cu – 94,0 и 61,4 отн.%, соответственно. Данные результаты подтверждают правомочность сделанного прогноза.

Таким образом, в заключение могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. На месторождении Кимпиче выделяются два природных типа руд, отличающиеся по степени (интенсивности) окисления: 1) первичные (слабо окисленные) руды; 2) окисленные (частично окисленные) руды. Руды выделенных природных типов отличаются по химическому и минеральному составу, а также по своим текстурно-структурным характеристикам. Основным критерием для отнесения руд к определенному природному типу является значение $K_{Fe}$=2, которое рассчитывается как отношение содержаний $Fe_2O_3$ / FeO.

2. Формы нахождения полезных и большинства вредных компонентов, оказывающие наиболее существенное влияние на технологические свойства руд, в гипогенных и гипергенных минеральных агрегатах существенно различаются. В первичных рудах основными концентраторами как полезных, так и вредных компонентов являются блеклые руды. В гипергенных агрегатах основными формами нахождения серебра являются гипергенные сульфиды, сульфосоли и самородное Ag, с доминированием акантита; сурьмы – сложные оксиды и гидроксиды стибиконитовой группы; меди – оксиды и гидроксиды, а также карбонаты. Все гипогенные и гипергенные серебросодержащие минералы (блеклая руда, гипергенные серебряные и серебросодержащие сульфиды и сульфосоли, самородное серебро) флотируются, тогда как большинство гипергенных минералов меди и сурьмы (карбонаты, сульфаты, оксиды и др.) флотируются значительно хуже сульфидов.

3. Большое влияние на технологические свойства окисленных руд месторождения оказывают структурные особенности гипергенных агрегатов и состав поверхности рудных минералов, определяющие поиск оптимальных режимов измельчения руды при пробоподготовке. Низкая механическая устойчивость гипергенных агрегатов не допускает переизмельчения руды, при этом, наличие гипергенных изменений состава поверхности рудных минералов требует определенного доизмельчения для улучшения раскрытия и получения “свежих” сколов на поверхности зерен.

4. Прогнозное извлечение серебра по данным изучения вещественного состава составит >90 % для обоих выделенных природных типов руд, что позволяет считать их легкообогатимыми. По полученным значениям прогнозного извлечения меди и сурьмы из окисленных руд – они упорные.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Аристов В.В., Тихонова Н.В., Орлова Г.Ю. и др.* Кимпиче – месторождение нового типа в Западном Верхоянье.// Руды и металлы. 2006. № 2. С. 28–41.
2. *Двуреченская С.С.* Гипергенные минералы серебряных месторождений. М.: ЦНИГРИ, 2001. 258 с.
3. Минералогические таблицы. Справочник. М.: Недра, 1981. 399 с.
4. *Остапенко Л.А.* Принципы прогноза технологических свойств окисленных серебряных руд по данным изучения вещественного состава // Руды и металлы. 2010, № 6. С. 22–32.

5. *Остапенко Л.А., Двуреченская С.С., Рыжов О.Б.* Природные типы серебряных руд и критерии их выделения на месторождениях с развитой зоной окисления // Руды и металлы. 2010, № 5. С.23–33.
6. *Остапенко Л.А., Аристов В.В., Рыжов О.Б. и др.* Условия формирования зоны окисления на месторождении Кимпиче (Западное Верхоянье) // Отечественная геология. 2011, № 1. С. 43–58.
7. *Смолянинов Н.А.* Практическое руководство по минералогии. М.: Недра, 1972. 360 с.
8. *Штрюбель Г., Циммер З.Х.* Минералогический словарь. Пер. с нем. М.: Недра, 1987. 494 с.
9. *Яхонтова Л.К., Грудев А.П.* Минералогия окисленных руд. М.: Недра, 1987. 197 с.

# О ВЛИЯНИИ ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ НА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

***Зинчук Н.Н.***

ЗЯНЦ АН РС(Я), г. Мирный, nnzinchnk@rambler.ru

Обогащение алмазоносных пород и извлечение из них алмазов – процесс сложный, базирующийся на современных достижениях многих отраслей знаний. Очень важно по этому вопросу остановиться на основных аспектах влияния вещественного состава кимберлитовых пород на технологию обогащения и извлечения из них алмазов, в основе которой лежат физические свойства полезного компонента. Алмазы характеризуются целым рядом специфических свойств [9] и технических параметров, успешно использующихся при обогащении кимберлитов и извлечении алмазов из концентратов. К ним относятся: содержание алмазов в породе; крупность их кристаллов; морфология зерен; плотность; твердость; различные типы люминесценции; гидрофобность и способность прилипать к определённым жирам; немагнитность; слабая электропроводность; прозрачность и др., на которых основаны методы обогащения кимберлитов и извлечения из них полезных кристаллов.

Как показали наши исследования [4–8, 10–15], работы других специалистов [1–3, 16], большая часть кимберлитовых пород Якутской, Архангельской и Африканской алмазоносных провинций на 90–95 % сложена вторичными минералами, являясь по сути апокимберлитовыми породами. Вторичными минералами кимберлитов мы называем [6–8, 11–12] все минералы, образовавшиеся из растворов (не только постмагматических ювенильных, но и поступивших в период формирования диатрем и на более поздних этапах их становления). Главными вторичными минералами кимберлитов являются серпентин и кальцит. К второстепенным следует относить все остальные минералы, возникшие на разных стадиях изменения пород в кимберлитовых трубках: силикаты (хлорит, вермикулит, тальк, монтмориллонит, сепиолит, таумасит); карбонаты (доломит, арагонит, пироаурит, шортит, стронцианит, магнезит, гидромагнезит, хантит); окислы и гидроокислы (магнетит, гематит, гётит, амакинит, кварц, халцедон, брусит); сульфиды (пирит, сфалерит, галенит, миллерит, пирротин, пентландит, халькопирит, точилинит); сульфаты (ангидрит, гипс, целестин, барит, эпсомит, метабазалюминит, брошантит); галогениды (галит); фосфаты (франколит); бораты (екатеринит, ферроссайбелиит). Вторичные минералы образуются в постмагматическую стадию и являются определяющими при формировании целого комплекса свойств кимберлитов, в том числе таких, как крепость, пористость, влажность, содержание тяжёлой фракции и доминирующих люминесцентных компонентов. Эти свойства играют важную роль при обогащении, поэтому изучение вторичной минерализации кимберлитов приобретает важное значение для решения технологических вопросов переработки алмазосодержащих руд. Поэтому очень важно для совершенствования технологических процессов отработки коренных месторождений алмазов знать особенности и закономерности распределения преобладающих минералов, как в плане диатремы, так и на разведанную глубину. С этой целью нами [5–8] проведен

с рентгеновским контролем пересчёт валовых химических анализов на минеральный состав по методике, разработанной совместно с Ю.М. Мельником [11, 12]. Использовался для этого каменный материал, отобранный по опорным горизонтам из эксплоразведочных скважин, пройденных по сетке 40 × 40 м, что позволило составить карты распространения отдельных минералов. В свою очередь, изучение на разведанную глубину каменного материала, отобранного с интервалом через 5–10 м (со сгущением в местах макроскопической смены геолого-петрографических типов пород) из керна разведочных скважин дало возможность построить минералого-петрографические разрезы на вскрытые глубины диатрем. Полученные таким образом качественные и количественные характеристики по породообразующим и вторичным минералам контролировались изучением прозрачных шлифов кимберлитов и рентгенодифрактометрическими исследованиями. Несмотря на то, что такие исследования проведены нами для всех разрабатываемых коренных месторождений алмазов Якутской провинции, в качестве примера в настоящей работе приведём материалы по кимберлитовым трубкам Удачная (Далдыно-Алакитский алмазоносный район) и Мир (Мало-Ботуобинский алмазоносный район), характеризующихся различным геологическим строением и составом слагающих их пород. Кроме минералогического картирования отдельных опорных горизонтов разрабатываемых кимберлитовых трубок, для выяснения пространственных закономерностей распределения минералов нами использован [5, 6] современный математический аппарат обработки полученных лабораторно-аналитических материалов, что позволило получить данные о вариациях как общего содержания вторичных минералов, так и их распределения по площади на разных уровнях диатремы и на её разведанную глубину.

С целью определения влияния на изменение кимберлитов гипергенных процессов, на примере кимберлитовой трубки Удачная, имеющей сложное геологическое строение [2–6, 15–16], проведено минералогическое картирование горизонта, практически не затронутого этими преобразованиями материнских пород (нижний горизонт – 190 м), частично изменённых (средний горизонт – 250 м) и наиболее изменённых образований (верхний горизонт – 295 м). В восточном теле трубки Удачная кимберлиты нижнего горизонта характеризуются сравнительно низкими содержаниями хлорита, кальцита, гипса и повышенными – флогопита и доломита. Заметно меньший здесь разброс значений концентрации серпентина, гипса и хлорита. В то же время наблюдаются резкие колебания в содержании кальцита и особенно доломита, указывающие, по-видимому, на неравномерность проявления процессов карбонатизации и распределения в кимберлитах ксенолитов вмещающих пород. В западном теле количественные соотношения и распределение рассматриваемых компонентов по горизонтам несколько отличаются от восточного, хотя основные тенденции и здесь сохраняются. Пространственное распределение *серпентина* в породах этого горизонта восточного тела трубки Удачная свидетельствует о достаточно равномерном содержании его в центральной части. Повышенные значения тренда приурочены к контактам с вмещающими породами, особенно на южном фланге трубки, где намечается некоторая линейность в распределении серпентина. К центру трубки содержание минерала постепенно уменьшается. Довольно чётко фиксируется субширотная зона с более низкими значениями тренда, достигающими минимумов к контактам с западным телом и вмещающими породами на востоке. В северной половине трубки максимальные значения наблюдаются в северо-западной и северо-восточной приконтактовых зонах, разделенных минимумом у северных границ. В западном теле содержание серпентина постепенно возрастает к контактам с восточным телом и убывает к юго-западным и западным границам. Ориентировка изолиний близка к субмеридиональной. Пространственного соотношения с трендом восточного тела не наблюдается.

Вверх по разрезу (средний горизонт) содержание серпентина в восточном теле трубки в среднем несколько уменьшается, но существенно возрастает неоднородность и разброс значений (дисперсия увеличивается более, чем в два раза). Заметно меняется (при сохранении общей тенденции) и характер его площадного распределения. В ориентировке изолиний и отдельных элементов поверхности тренда доминирует северо-восточное простирание. Значения тренда минимальны на контакте с западным телом и северо-западной границе с вмещающими толщами. В

южной половине трубки наблюдается примерно та же картина. Кимберлиты западного тела на этом горизонте характеризуются некоторым общим снижением концентрации серпентина. Заметно меняется и его распределение. Наиболее высокие значения зафиксированы юго-западнее центра трубки. К контактам с восточным телом содержание серпентина падает. В приконтактовой зоне наблюдается определенное соотношение (корреляция) с трендами восточного тела.

Тенденция некоторого снижения содержания серпентина в восточном теле трубки Удачная вверх по разрезу при одновременном возрастании неоднородности подтверждается и анализом данных по верхнему горизонту, в различной степени затронутом гипергенными преобразованиями. Существенных отличий в среднем и дисперсии серпентина от предыдущего горизонта не наблюдается, однако его распределение по площади трубки резко отличается от рассмотренных выше. Если на двух предыдущих горизонтах просматривалась определенная линейность в его распределении (особенно в южной половине трубки), то здесь наблюдается четко выраженная концентрическая зональность с возрастанием значений тренда к периферии трубки, то есть степень серпентинизации кимберлитов возрастает к контактам с вмещающими породами (исключение составляет юго-восточный контакт). На фоне общей зональности распределения серпентина в пределах трубки выделяются три локальных экстремума овальной формы, длинные оси которых ориентированы в северо-западном направлении. Один из них указывает на некоторое увеличение серпентина в центральной части трубки, а два других – на участки с пониженными значениями тренда справа и слева от первого. Верхний горизонт в западном теле характеризуется более высокой степенью серпентинизации и четко выраженной концентрической зональностью распределения с максимумом в центре трубки с постепенным снижением к периферии.

В кимберлитах трубки Мир максимальная концентрация серпентина (до 60–80 %) приходится на её центральную часть. Такое же содержание (до 60 %) установлено и вблизи крупного ксенолита вмещающих пород в юго-восточной части трубки. В целом среднее содержание серпентина здесь близко к 50 %. Повышенные концентрации этого минерала установлены и в северо-восточной части диатремы.

Содержание *флогопита* рассчитывалось по концентрациям в породе $K_2O$. Полученные таким образом значения (до 10 % и более) представляются нам несколько завышенными (по сравнению с данными петрографического изучения кимберлитов). По-видимому, некоторая часть $K_2O$ в кимберлитах входит в состав других, не обнаруженных под микроскопом, фаз. Возможно, слюдистый минерал, кроме флогопита, представлен пелитоморфным селадонитом, двупреломление которого кажется низким из-за ничтожного размера частиц минерала. Не исключено, что избыточная часть калия в кимберлитах рассеяна в межзерновом пространстве или адсорбирована минералами, в которых он не является структурным элементом. Более четко выражена в восточном теле трубки Удачная тенденция постепенного снижения вверх по разрезу содержания флогопита. Средние значения меняются от 5,66 % на нижнем горизонте трубки, до 3,89 % – в верхней её части. В кимберлитах нижнего горизонта максимальные содержания характерны для центральной и юго-западной частей трубки, включая контакты с западным телом. Просматривается определенная зональность в его распределении с тенденцией убывания к периферии трубки. В западном теле отчётливой тенденции количественного изменения содержания флогопита вверх по разрезу не выявлено. На всех трех горизонтах средние значения концентрации минерала стабильны, только на среднем горизонте их разброс несколько меньше. Дисперсия в этом случае значимо отличается (при $q = 0{,}05$) от дисперсий на других горизонтах. Более заметны различия в распределении флогопита по площади. На рассматриваемом горизонте минимальные значения тренда наблюдаются в приконтактовой зоне на востоке, а также вдоль ее южных границ. К западу от этой зоны содержание флогопита постоянно возрастает. Лишь несколько западнее центра трубки наблюдается незначительное снижение концентрации минерала, а далее оно вновь увеличивается, достигая максимума к контактам с вмещающими толщами. Ориентировка изолиний преимущественно субгоризонтальная. Выше по разрезу (средний горизонт) отмеченная в восточном теле на нижнем горизонте тенденция сохраняется. Повышенные значения содержания флогопита локализуются

преимущественно в центральной части трубки и в приконтактовой (с западным телом) зоне, хотя непосредственно к контактам значения тренда падают. В западном теле содержание флогопита на этом горизонте достаточно равномерное, значительных отклонений от среднего не наблюдается. Отмеченный на предыдущем горизонте минимум у контакта с восточным телом здесь сменился максимумом, причём ориентировка изолиний примерно та же. На западном фланге изолинии приобретают субширотную ориентировку, а максимум имеет более локальный характер. В породах верхнего горизонта в восточном теле содержание флогопита заметно ниже и распределен он более равномерно. Только на северо-западе выделяется зона с более высокими содержаниями этого минерала. Распределение флогопита на верхнем горизонте западного тела несколько меняется по сравнению со средним горизонтом, хотя наметившаяся там тенденция сохраняется и здесь – повышенные значения на западном и восточном флангах трубки и некоторое снижение в центральной части. Западный максимум в этом случае охватывает и северо-запад трубки (изолинии ориентированы в субширотном направлении). Восточная зона повышенных значений здесь смещена несколько к югу и имеет северо-восточную ориентировку.

Содержание *хлорита* в восточном теле трубки Удачная минимально на нижнем горизонте и вверх по разрезу диатремы несколько возрастает, причём наиболее высокие значения приурочены к среднему горизонту, а к самим верхним частям трубки фиксируется некоторое его снижение при одновременном возрастании неоднородности распределения. Примерно та же картина наблюдается и в западном теле трубки. К среднему горизонту концентрация хлорита и разброс значений заметно возрастает, а затем несколько снижается. Более существенные отличия устанавливаются в его пространственном распределении на разных глубинах. В пределах нижнего горизонта в восточном теле повышенные значения тренда наблюдаются на восточном и северо-западном флангах трубки вдоль контактов с вмещающими породами, а также в ее центральной части. Изолинии и элементы поверхности тренда характеризуются преимущественно северо-восточным простиранием. Четкий минимум выделяется вблизи контакта с западным телом и в приконтактовой зоне вдоль южной границы, а также на северо-востоке. В западном теле повышенные значения тренда фиксируются в восточной половине трубки, а западная часть попадает в зону относительного минимума. На среднем горизонте распределение хлорита в кимберлитах восточного тела отличается от рассмотренного выше и примерно совпадает по конфигурации с трендом серпентина на этом горизонте. Наблюдается четкая северо-восточная ориентировка изолиний и элементы линейности распределения. Повышенные значения тренда фиксируются вдоль контакта с западным телом. В центральной части трубки содержание хлорита несколько снижается, достигая минимума на ее северо-восточном фланге, а в северной приконтактовой зоне и в южной части оно возрастает. В западном теле отмеченная на нижнем горизонте зона максимума становится более обширной, охватывая практически всю северо-восточную часть трубки. Содержание хлорита снижается только у северо-западных и юго-восточных контактов с вмещающими породами. В верхней части разреза (верхний горизонт) максимальные значения хлорита в восточном теле трубки приурочены к ее юго-восточной части, особенно вдоль контактов с вмещающими толщами, а на северо-западном фланге выделяется вытянутый в северо-восточном направлении минимум с центром на контакте с западным телом. Непосредственно к контактам с вмещающими породами содержание хлорита и здесь постепенно возрастает. Устойчив минимум на северо-восточном фланге трубки, прослеживающийся на всех трех описываемых опорных горизонтах. В западном теле распределение минерала совсем иное, чем на среднем горизонте. На месте отмеченных там максимумов здесь располагается зона пониженных значений хлорита, примыкающая непосредственно к контактам с восточным телом. Вдоль северной границы трубки содержание хлорита минимально. Повышенные значения приурочены к приконтактовой зоне вдоль ее юго-западных границ. К северо-западу эта зона несколько расширяется и в виде отдельного «языка» прослеживается почти до северо-восточных контактов с вмещающими породами.

В трубке Мир хлорит распределен по всей площади изучаемых горизонтов сравнительно равномерно, хотя отдельные максимумы (до 20–25 %) установлены в центральных и краевых ее

участках (в частности, много хлорита в юго-восточной части тела). В местах повышенного содержания хлорита обычно уменьшается концентрация флогопита, что связано с хлоритизацией первичного минерала.

Резко меняется в изученных трех горизонтах трубки Удачная распределение карбонатных минералов – *кальцита и доломита*. Так, в восточном теле трубки вверх по разрезу постепенно возрастает содержание кальцита и убывает – доломита. При этом нижний горизонт характеризуется существенным разбросом значений, которые могут быть следствием как неравномерной карбонатизации кимберлитов, так и неравномерного распределения ксеногенного материала. В западном теле содержание карбонатов также характеризуется существенным разбросом значений (особенно доломита). В распределении кальцита наблюдается обратная, по сравнению с восточным телом, закономерность – на верхнем горизонте содержание кальцита ниже, чем на двух предыдущих. В отношении доломита тенденция также сохраняется – вверх по разрезу его содержание постепенно падает. По этим двум минералам устанавливаются значимые отличия верхнего горизонта от двух других нижележащих. На нижнем горизонте в восточном теле максимальные значения тренда кальцита тяготеют в основном к приконтактовым зонам трубки, свидетельствуя, вероятно, о частичной инфильтрации карбонатного вещества из вмещающих кимберлиты пород. В распределении доломита наблюдается обратная, по сравнению с кальцитом, картина – повышенные содержания приурочены в основном к центральной части трубки с незначительными локальными максимумами на восточном и западном флангах, а также у северных контактов с вмещающими породами. В западном теле распределение кальцита имеет довольно сложное строение и характеризуется северо-западной ориентировкой элементов поверхности тренда. Увеличение содержаний кальцита фиксируется в приконтактовых зонах на северо-востоке и юго-западе трубки, причем непосредственно к контактам с вмещающими породами оно постепенно падает. В породах центральной части месторождения, начиная от юго-восточных контактов с восточным телом и до ее северо-западных границ, кальцит распределен более равномерно и его содержание несколько ниже. В содержании доломита, наоборот, проявляется четкая тенденция его увеличения к контактам с вмещающими породами. Отчетливый минимум фиксируется в южной части трубки, а в северной половине, на ее восточном и западном флангах, наблюдается два глубоких минимума. Заметна некоторая корреляция тренда доломита с аналогичным трендом восточного тела на контакте двух трубок.

К следующему среднему горизонту в восточном теле трубки ситуация существенно меняется. Наиболее высокие содержания кальцита зафиксированы в приконтактовой зоне на западе, а остальная часть трубки характеризуется достаточно равномерным распределением этого минерала с постепенным убыванием к ее восточным границам. Максимальная концентрация доломита у контакта с западным телом, отмеченная на нижнем горизонте, повторяется и на этом уровне. Центральная часть тела характеризуется субширотной зоной пониженного содержания доломита. К востоку от нее значения тренда постепенно возрастают, достигая максимумов у северо- и юго-восточных контактов с вмещающими толщами. В западном теле распределение карбонатов на этом горизонте коренным образом меняется. Изолинии здесь имеют почти меридиональное простирание, отчетливо прослеживается увеличение концентрации кальцита к периферии трубки. Доломит распределен более равномерно. Повышенные его значения приурочены к приконтактовой зоне с восточной и южной частях трубки (но не самих контактах), и, в меньшей степени, к ее северному флангу, а непосредственно у контактов с вмещающими породами его содержание уменьшается. Как и в предыдущем случае, прослеживается определенная корреляция с трендом восточного тела.

Распределение кальцита на верхнем горизонте в восточном теле несколько иное, чем на предыдущем горизонте, и характеризуется тремя зонами экстремумов северо-восточного простирания – максимумы на восточном фланге и у контакта с западным телом разделены зоной пониженного и относительно равномерного распределения кальцита. Содержание доломита на этом горизонте наиболее низкое и распределение его достаточно равномерное. Некоторое повышение

значений тренда наблюдается у южных и северо-западных контактов с вмещающими породами. В западном теле трубки Удачная конфигурация тренда кальцита на этом горизонте заметно меняется и имеет более сложное строение, но наметившаяся на предыдущем горизонте тенденция увеличения содержания к периферии трубки сохраняется. В центре фиксируется четкий минимум, к северу, западу и юго-востоку от которого значения тренда постепенно возрастают. Резко отличается от предыдущего горизонта и тренд доломита, который характеризуется четкой зональностью – максимальные значения в центре трубки и постепенное увеличение содержания к периферии.

Повышение концентрации кальцита обычно приурочено и к приконтактовым частям трубки Мир, однако здесь имеются отклонения от этого общего правила. Так, в отдельных пробах из центральной части ее верхних горизонтов содержание $CaCO_3$ достигает 17 %, в то время как в близлежащих участках порода им заметно обеднена. Примерно равные количества карбоната кальция (до 15 %) наблюдаются в юго-восточной части трубки. Также неравномерно распределен и доломит в верхних горизонтах трубки Мир, которые в целом бедны доломитом, хотя и здесь в отдельных пробах его содержание достигает 36 %. В отличие от кальцита, доломит обычно концентрируется в западной и центральной частях верхних горизонтов трубки.

*Магнетит* и *гидроксиды железа* целесообразно рассматривать вместе, поскольку произвести точный учет их по отдельности, как путем пересчетов химических анализов, так и другими (в том числе и рентгенометрическими) методами исследований очень трудоемко. При этом следует отметить, что гидроксиды железа в виде гетита и аморфных частиц в породах присутствуют в небольшом количестве. Более распространены они по трещинам и микротрещинам. Интенсивная бурая и коричневая окраска измененных пород зависит не столько от концентрации в ней гидроксидов железа, сколько от особенностей их распределения. Так, равномерно распределенные пелитоморфные гидроксиды интенсивно окрашивают породу, а в случае концентрации такого же их количества в локальных участках порода выглядит слабо- или пятнистоокрашенной. Отметим, что во многих случаях в верхних горизонтах магнетит также замещается гидроксидами железа. В целом формы $Fe^{3+}$ распределены в трубках неравномерно. Их повышенные концентрации встречаются как в центральной части трубок, так и на периферии. Здесь нет сплошной «круговой» зоны обогащения этими минералами, а идет дискретное чередование максимальной и минимальной их концентраций. Наиболее обогащена $Fe^{2+}$ западная часть трубки Удачная, а также центральный и северный стыки между восточным и западным телами. В плане верхних горизонтов трубки Мир оксиды и гидроксиды железа распределены в основном равномерно.

*Сульфиды железа* в верхних горизонтах трубки Удачная также распределены довольно неравномерно, но отмечаются и некоторые закономерности. Так, в западном теле их содержание выше 0,5 % приурочено к центральной части трубки, а краевые части ими обеднены. Исключение составляют северные и южные участки восточной части западного тела. Центральная часть восточного тела, наоборот, бедна сульфидами, а повышенное их количество наблюдается на восточном фланге. Сульфиды железа в кимберлитах верхних горизонтов трубки Мир содержатся в небольшом количестве (до нескольких процентов), а повышенное их содержание приурочено к отдельным краевым участкам трубки. Особенно много аномально повышенных содержаний этих минералов в юго-восточной части трубки. Иногда наблюдается прямая связь между повышенными концентрациями в породе гидроксидов (оксидов) и сульфидов железа. Судя по характерной желто-коричневой окраске, железистые минералы распределены в верхних частях трубки неравномерно, пропитывая небольшие участки породы.

Минералы кремнезема (*кварц* и *халцедон*) наиболее распространены в западном теле трубки Удачная. Зоны их повышенного содержания наблюдаются у контактов трубки с вмещающими породами и крупных ксенолитов карбонатных пород на границе восточного и западного тел. При химических пересчетах на минеральный состав здесь фиксируется почти постоянное присутствие свободного кремнезема в кимберлитах. В основной массе кимберлитов концентрация его

минералов редко превышает 10 %, тогда как в жильных образованиях содержание кремнезема иногда достигает 98 %. Кимберлиты восточного тела трубки Удачная значительно беднее кремнеземом, чем породы западного тела. В свою очередь, кварц и халцедон в плане верхних горизонтов трубки Мир распределены также довольно неравномерно. Содержание их колеблется от 1 до 10 %, а максимальная концентрация установлена в образцах из отдельных участков у восточного контакта трубки (до 20 %).

*Гипс* в восточном теле трубки Удачная на нижнем опорном горизонте трубки Удачная распределен достаточно равномерно (дисперсия на порядок ниже, чем на двух других горизонтах). Роль гипса возрастает на северном и юго-западном флангах трубки, а на контакте с западным телом значения его тренда минимальны. Северная часть трубки характеризуется преимущественно субширотным простиранием изолиний тренда (сохраняющимся и на двух других сравниваемых горизонтах). В западном теле распределение гипса по разрезу существенно не меняется. Значимые отличия зафиксированы только по дисперсиям. Минимальный разброс значений наблюдается, как и в восточном теле, также на нижнем горизонте. Поверхность тренда на этом горизонте имеет довольно простой вид и по ориентировке изолиний совпадает с трендом кальцита. Для южной части характерны более высокие содержания гипса, постепенно возрастающие к северо-западной границе трубки. К северо-востоку от этой зоны фиксируется широкая полоса с минимальным содержанием гипса в кимберлитах, особенно у контактов с восточным телом. Непосредственно к контактам с вмещающими породами значения тренда вновь начинают расти. Выше по разрезу (средний горизонт) в восточном теле возрастает неоднородность распределения гипса, в основном за счёт увеличения его содержаний в приконтактовой зоне на северо-востоке и западе трубки и существенного уменьшения в центре. В западном теле и на среднем горизонте наиболее высокие содержания гипса устанавливаются в северной половине трубки и приконтактовой зоне на ее южном фланге. Эти две зоны разделяются полосой субширотного простирания с более низкими значениями тренда. Минимальные значения фиксируются у западных и восточных границ трубки. Корреляции с аналогичным трендом восточного тела нет. Распределению гипса в породах верхнего горизонта восточного тела соответствует четко выраженная линейность субширотного простирания. Повышение значений тренда наблюдается у контактов с вмещающими толщами на северном и южном флангах трубки, а также на контакте с западным телом. В западном теле наблюдается отчетливый минимум, вытянутый в меридиональном направлении, в центральной части и постепенное увеличение содержания гипса в кимберлитах (как и в восточном теле) к ее контактам с вмещающими толщами. Корреляция с трендом восточного тела отсутствует. Немного (обычно первые доли процента) гипса и ангидрита присутствует в кимберлитах верхних горизонтов кимберлитовой трубки Мир. Аномально высокая (более 20 %) концентрация $CaSO_4$ приурочена к восточному контакту трубки. Здесь же отмечено повышенное содержание сульфидов и оксидов железа. До 8 % $CaSO_4$ содержится в краевой северо- и юго-восточной частях трубки. Обычно его повышенные концентрации тяготеют к контактам различных пород.

Если распределение вторичных минералов по латерали можно количественно определить более или менее точно, то такие оценки на глубину сопряжены с большими трудностями. Связано это, прежде всего, со сравнительно малым количеством скважин, вскрывших глубокие горизонты диатрем. По латерали такие исследования можно провести с использованием гораздо большего количества скважин по опорным горизонтам коренных месторождений алмазов или готовящихся к промышленной отработке трубок. Обычно минералогический состав кимберлитовых пород изменяется с глубиной. Вторичные минералы кимберлитов можно разделить на основные, слагающие кимберлитовую породу, и жильные, отложившиеся в пустотах в виде кристаллов и почти мономинеральных агрегатов. Существует некоторая взаимосвязь между этими категориями вторичных минералов. Основные минералы, равномерно распределенные в кимберлите, нередко могут выполнять и трещины. К таковым можно отнести кальцит, серпентин (серпофит), отчасти сульфиды и оксиды железа. К сугубо жильным образованиям следует отнести целестин и барит.

Остальные минералы (пироаурит, сепиолит, галит и др.) являются, по нашему мнению, преимущественно жильными образованиями, хотя они нередки и в основной массе кимберлитов. Изучая кимберлитовые породы, необходимо учитывать, как на данном участке распределен тот или другой минерал – равномерно в породе или обособляется локально. Очень важно для изучения закономерностей распределения вторичных минералов кимберлитов отбирать по возможности усредненные пробы, которые могли бы объективно характеризовать породу в целом для данного конкретного участка. Иначе вместо проб кимберлита как породы получаются пробы с мономинеральных образований, которые могут относиться к минералам другого (не кимберлитового) состава.

По результатам изучения керна некоторых скважин мы попытались проследить особенности распределения в трубках на глубину, как вторичных минералов основной массы кимберлитов, так и жильной минерализации. Так, при изучении вторичных образований основной массы кимберлитов по нескольким скважинам трубки Сытыканская установлено, что породообразующими минералами являются здесь серпентин и кальцит. Их количественные соотношения довольно изменчивы по разрезу трубки и резко различны в разных типах кимберлитов. Так, в кимберлитовой брекчии основная масса почти полностью представлена смесью серпентина и кальцита. Содержание серпентина здесь редко превышает 45–50 %, а содержание кальцита местами достигает до 90 %. Примесь других вторичных минералов незначительна (в сумме не более 10 %). Вниз по разрезу количество кальцита постепенно уменьшается (до глубины 350 м), а увеличивается примесь измененного флогопита, хлорита и иногда доломита. В нижних частях разрезов трубки Сытыканская в основной массе кимберлитов резко возрастает содержание серпентина (до 80 %) и уменьшается вплоть до полного исчезновения количество кальцита. Для некоторых проб характерно также резкое накопление в основной массе пироаурита (до 40 %), что придает породе голубоватый оттенок и внешне резко отличает ее от других типов. Накопление в отдельных образцах кальцита (глубины 350-470 м) объясняется присутствием крупных автолитов другого типа кимберлитов (кимберлитовой брекчии), обогащенных этим минералом. В верхах разрезов содержание кальцита и серпентина, по сравнению с нижележащими горизонтами, несколько уменьшается, вследствие чего увеличивается роль других минералов. Это объясняется, по нашему мнению [6, 7], гипергенными преобразованиями кимберлитов этой части разреза с формированием слабо выраженной остаточной коры выветривания.

Анализируя количественное распределение серпентина и кальцита по отдельным разрезам, вскрывшим глубокие горизонты трубки Удачная, можно заметить, что на различных глубинах содержание этих минералов изменяется без четкой взаимосвязи. Более заметно меняется концентрация серпентина. В целом в кимберлитах восточного тела изменения содержания кальцита и серпентина достаточно близки, в отличие от западного тела, где колебания последнего более значительны. Но и в восточном теле отмечаются существенные отклонения от общей закономерности. Так, в интервале глубин до 400 до 600 м (скв.203) отмечается уменьшение до минимума содержание серпентина, а количество кальцита здесь почти не меняется. Концентрация серпентина снижается также в интервалах 850–920 и 940–1000 м. Это связано, по нашим данным, с присутствием в глубоких горизонтах западного тела крупных блоков пород со сравнительно свежим оливином, слагающим в отдельных случаях до 60 % объёма кимберлита. В других разрезах (скв.221 этого же тела) хотя и намечается резкое уменьшение концентрации серпентина с глубиной, но характер его распределения внутри отдельных интервалов несколько иной, что может свидетельствовать о горизонтальной изменчивости концентраций породообразующих минералов и на глубоких горизонтах. В интервале глубин 250–320 м (скв.221) резко падает и содержание карбоната кальция, что также характерно для разрезов первого типа. Довольно неравномерно изменяется в описываемых разрезах концентрация доломита. Отдельные блоки, содержащие до 16 % этого минерала, отмечаются по разрезам без какой-либо закономерности, что, вероятно, связано с пятнистым распределением ксеногенного материала в отдельных опорных горизонтах глубоких частей трубки. В отличие от этих двух типов разрезов восточного тела, минералогический состав

аналогичных частей западного тела (скв.209 и др.) характеризуется более резкими колебаниями уже с верхних горизонтов. Наименьшее содержание серпентина зафиксировано в интервалах 360–410, 420–530 и 810–830 м. Также довольно неравномерно ведут себя по разрезам на вскрытую скважинами глубину кимберлитовых трубок и другие породообразующие и жильные вторичные минералы. Более стабильны, чем другие минералы, в разрезах восточного и западного тел оксиды и гидроксиды железа. Из реликтовых минералов таким постоянством в кимберлитах обоих тел отличается только флогопит.

По разрезу кимберлитов ряда глубоких скважин в трубке Мир нами проведён анализ прожилковой вторичной минерализации. Чёткой закономерности в распределении этих минералов в данных разрезах не установлено, хотя нередко вместо исчезнувших новообразований появляются другие. Всё же можно сделать некоторые выводы:

а) гипс установлен только в верхней части трубки (до глубины 625 м, что в целом соответствует глубинам «вечной мерзлоты» в описываемых регионах);

б) целестин также приурочен к верхней части разреза (интервал 615–660 м);

в) ассоциирует с целестином ограненный кальцит;

г) в ассоциации с галитом обычно находится ангидрит и реже гипс;

д) сульфиды железа иногда встречаются совместно с гипсом;

ж) пироаурит прослеживается на всю глубину скважины и ассоциирует с гидроксидами железа, замещающими его.

Судя по другим скважинам, галит в трубке Мир резко преобладает над иными вторичными минералами. Изменчив состав его ассоциаций с этими минералами. Так, в разрезе скв.50 с галитом встречаются гидроксиды железа и ангидрит, а в разрезе скв.62 развит один галит. В этих разрезах не обнаружен пироаурит, который вместе с галитом и сульфидами железа встречен в разрезе, вскрытом скв.52. Пересчёт химических анализов кимберлитов трубки Мир на минеральный состав также позволяет утверждать об отсутствии каких либо закономерностей в основной массе пород. Так, анализ проб кимберлитов из разреза, вскрытого скв.55, показал, что $CaSO_4$ (до 15 %) присутствует в основной массе кимберлитовых пород верхней части разреза (глубина 380–430 м), значительно уменьшаясь в его нижней части (глубина 440–540 м), где его концентрация меняется в пределах 3–11 %. Содержание кальцита здесь колеблется ещё больше (от 2 до 28 %). При этом какой-либо четкой зональности в его распределении не наблюдается. Отмечается только приуроченность его максимальных содержаний к низам разреза (500–520 м). Концентрация же серпентина более значительна и обычно составляет 50–60 % объёма основной массы пород. Только в нижних частях его концентрация снижается до 35 %.

Таким образом, в результате проведённых исследований нами установлены отличия в минеральном составе новообразований не только в разных трубках, но и в разрезах отдельных тел или блоков одной и той же трубки. Например, в кимберлитовых породах западного тела трубки Удачная вторичные процессы проявились более интенсивно, отчего породы здесь иногда полностью переработаны. Вторичные же изменения пород восточного тела выражены слабо, что видно по неполной серпентинизации оливина, меньшему содержанию других вторичных минералов и сравнительно небольшим приконтактовым изменениям. В трубке Мир на распределение одних минералов влияет расположение анализируемых проб относительно контактов тела, содержание других – обратно пропорционально концентрации их прототипов. Но существуют и отдельные участки, в плане которых наблюдаются аномальные количества большинства вторичных минералов. К ним следует отнести, в частности, юго-восточную и восточную части трубки Мир. Причиной таких аномалий могут быть, прежде всего, лучшие, чем на других участках, гидродинамические условия, обусловленные тектоническими и другими (в том числе структурно-текстурными) факторами. Обобщая результаты комплексного изучения новообразований на глубину некоторых трубок, можно отметить, что вторичные минералы и здесь ведут себя по-разному. В одних случаях (трубка Удачная) пока не установлены четкие закономерности смены ассоциаций, как породообразующих компонентов, так и минералов-

примесей. Однако установлена неравномерность серпентинизации оливина, связанная, по-видимому, с чередованием в разрезах блоков пород с различной трещиноватостью. Это привело к слабому замещению реликтовых минералов в одних блоках, и более интенсивной их серпентинизации – в других. Образование блоков плотных кимберлитов нередко связано с процессами наложенной карбонатизации пород. В других случаях (трубки Сытыканская, Мир и др.) установлены довольно четкие закономерности в распределении, как породообразующих новообразований основной массы пород, так и прожилковой гидротермальной минерализации. Это позволяет использовать отмеченные закономерности в распределении минералов-новообразований для типизации кимберлитовых пород.

В процессе проведённых нами исследований установлены некоторые закономерности распределения породообразующих вторичных минералов, как в верхних частях, так и на разведанную глубину (до 1200 м) отдельных трубок [7, 12–15]. В кимберлитах широко распространён ряд минералов, о присутствии которых исследователи ранее даже не подозревали или имели лишь отрывочные сведения. Так, в отдельных горизонтах кимберлитов некоторых трубок (Мир, Юбилейная, Сытыканская, Удачная и др.) в роли породообразующих минералов выступают пироаурит, амакинит, брусит, галит и др., которые иногда достигают до 30–40 % объёма породы. Повышенное содержание в кимберлитовых породах нетрадиционных для них вторичных минералов может оказывать существенное влияние на технологический процесс. От их количества может зависеть вязкость кимберлитов, выход шламов, влияющих на селективность и режимы работы пенной сепарации. Ряд вторичных минералов, обладающих адсорбционными свойствами (монтмориллонит, сапонит, различные смешанослойные образования, изменённые слюды и др.) способен в разной степени накапливать влагу в отдельных блоках кимберлитов и тем самым воздействовать на обогатимость породы. Особенно это характерно для верхних горизонтов кимберлитовых диатрем, затронутых процессами гипергенного воздействия, приведшими к образованию остаточной коры выветривания [6, 8]. Обычно в гипергенно изменённых кимберлитовых породах выносится легкорастворимый материал и накапливается труднорастворимый, в том числе и алмазы, что наблюдалось нами в верхних горизонтах трубок Интернациональная, имени XXШ сьезда КПСС, Мир, Сытыканская и др. В верхних горизонтах коры выветривания последних отмечено повышенное количество окрашенных алмазов. Увеличение доли алмазов, имеющих поверхностную окраску оттенка морской воды, наблюдалось и в верхних (выветрелых) горизонтах африканской трубки Финш. Во всех случаях с глубиной в слабо и вовсе не изменённых кимберлитах голубая окраска алмазов исчезает [9]. Участки (пятна) пигментации появляются также на алмазах, подвергшихся в естественных условиях радиоактивному воздействию. Наиболее часто алмазы такого типа встречаются, по мнению ряда исследователей, в древних докембрийских осадочных коллекторах и рассматриваются как признак древности. Такая эпигенетическая окраска алмазов может оказывать определённое влияние на особенности извлечения этого минерала из кимберлитовых концентратов Высокое содержание алмазов с оболочкой 1У разновидности (по классификации Ю.Л. Орлова) описано [9] в кимберлитовых диатремах Накынского кимберлитового поля. При этом в трубке Нюрбинская оболочка алмазов имеет большую интенсивность окраски и большую толщину, чем в трубке Ботуобинская, что отражается на их фотолюминесценции и может существенно влиять на эффективность их извлечения при обогащении таких пород.

В состав вторичных минералов кимберлитов входят многие элементы, различная сила связи которых в кристаллической решётке предопределяет неодинаковую растворимость этих новообразований или выщелачивание из них отдельных элементов, переходящих в реагенты, используемые при обогащении. Это изменяет состав реагентов, pH среды и тем самым снижает эффективность пенной флотации и сепарации. Кроме того, состав вторичной минерализации определяет особенности поверхностных плёнок и покрытий (оксиды железа, кальция и других образований) на кристаллах алмаза, от которых они не освобождаются при извлечении из кимберлитов и родственных им пород. Так, например, повышенное содержание магнетита в

кимберлитах некоторых трубок ряда алмазоносных районов Сибирской платформы приводит к тому, что часть алмазов, покрытая плёнками или оболочками этого минерала, приобретает магнитные свойства и попадает в магнитную фракцию. Наличие пленок вторичных минералов на кристаллах алмаза вызывает снижение его гидрофобности и тем самым влияет на его флотирующие свойства и прилипание к жировым поверхностям. Алмазы из некоторых африканских коренных месторождений покрыты слоем гидрофильного вещества в виде оксидов и гидроксидов железа, кальция, магния и др. Благодаря этим смесям алмазы становятся гидрофильными и не прилипают к жировым поверхностям. Немало различных плёнок содержат алмазы из коренных месторождений Якутской, Архангельской и Африканской алмазоносных провинций. Из сказанного следует, что процесс флотации алмазов в целом сильно зависит от состава вторичных минералов кимберлитов и родственных им пород, встречающихся в коренных диатремах.

При разработке различных горизонтов коренных месторождений алмазов большое значение придаётся изучению рентгеновской люминесценции алмазов и сопутствующих им компонентов – карбонатов, плагиоклаз содержащих ксенолитов и других светящихся минералов-новообразований. Для селективного извлечения рентгенолюминесцентными методами алмазов необходимо создавать такой режим аппаратов, чтобы другие люминесцирующие минералы не извлекались вместе с алмазами. Это также свидетельствует о том, что для совершенствования методики извлечения алмазов большое значение имеют сведения о вещественном составе и физико-механических свойствах кимберлитов. При совершенствовании методов обогащения и извлечения алмазов важно знать в перспективе, с какими рудами можно столкнуться на более глубоких горизонтах разрабатываемых месторождений, а тем более в кимберлитовых трубках, которые готовятся к разработке или будут эксплуатироваться в будущем. Так, повышенное содержание кальцита отмечено нами в верхних горизонтах трубок и в их приконтактовых частях, что связано с существенным разубоживанием кимберлитового материала терригенно-карбонатными породами, вмещающими трубки взрыва. С глубиной роль кальцита во многих кимберлитовых трубках снижается, однако нередко отмечаются блоки (столбы), где установлено его высокое содержание (до 50 % и более объема пород). Такие «столбы» карбонатизированных кимберлитов могут прослеживаться на всю разведанную глубину месторождений (до 1000 м и более). Очень высокая концентрация карбонатного материала характерна, в частности, для верхних горизонтов трубки Юбилейная (как и других, слабо эродированных диатрем Далдыно-Алакитского алмазоносного района), где чашеподобное тело вертикальной протяженностью почти до 200 м содержит до 70 % кальцита. Особо следует обратить внимание на кимберлиты глубоких горизонтов отдельных месторождений (Мир, Интернациональная и др.), в которых на глубинах 500–1200 м отмечено интенсивное вторичное минералообразование и сильная пропитанность солью, источником которой являются мощные слои соли во вмещающих трубки породах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Благулькина В.А., Ровша В.С., Сарсадских Н.Н.* К минералогии связующей массы кимберлита // Зап. ВМО, 1965, ч. 94, вып. 1, С. 471–476.
2. *Бобриевич А.П., Бондаренко М.И., Гневушев М.А. и др.* Алмазные месторождения Якутии. М.: Госгеолтехиздат, 1959, 527 с.
3. *Бобриевич А.П., Илупин И.П., Козлов И.Т. и др.* Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии. М.: Недра, 1964, 192 с.
4. *Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.* Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии.–Новосибирск: Наука, 1997, 574 с.
5. *Зинчук Н.Н.* Распределение вторичных минералов в кимберлитовых породах Якутии // Известия АН СССР. Серия геол. 1990, № 5, С. 70–83.
6. *Зинчук Н.Н.* Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы (в связи с проблемой поисков и разработки алмазных месторождений).–Новосибирск: изд-во Новосиб. ун-та, 1994, 240 с.

7. *Зинчук Н.Н.* Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // Геология и геофизика, 1998, Т. 39, № 12, С. 1704–1715.
8. *Зинчук Н.Н.*Постмагматические минералы кимберлитов. М.: Недра, 2000, 538 с.
9. *Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003, 603 с.
10. *Зинчук Н.Н., Лисковая Л.В.* Вторичные минералы основной массы кимберлитов Якутии // Геология алмазов – настоящее и будущее (геологи к 50-летнему юбилею г.Мирный и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж: изд-во Воронежского ун-та, 2005, С. 824–847.
11. *Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М.* Серпентины из кимберлитов // Бюлл. МОИП. Отдел геологич., 1998, Т. 73, Вып. 3, С. 56–68.
12. *Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Серенко В.П.* Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика, 1987, № 10, С. *66–72.*
13. *Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Харькив А.Д.* Пироаурит в кимберлитовых породах Якутии и его генезис // Докл. АН СССР, 1982, Т. 267, № 3, С. 722–728.
14. *Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Харькив А.Д.* Особенности состава и генезиса брусита в кимберлитах Якутии // Докл. АН СССР, 1983, Т. 269, № 2, С. 449–454.
15. *Зинчук Н.Н., Харькив А.Д., Мельник Ю.М., Мовчан Н.П.* Вторичные минералы кимберлитов. Киев: Наукова думка, 1987, 282 с.
16. *Милашев В.А.* Вторичные изменения кимберлитов // Тр.НИИГА, 1962, Т. 121, С. 165–185.

# ФТОРАММОНИЙНЫЙ СПОСОБ ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ ЛЕЙКОКСЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА ЯРЕГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

***Игнатьев Г.В., Перовский И.А.***

ИГ КомиНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар
ignatiev.grigoriy@gmail.com, igor-perovskij@yandex.ru

В настоящее время целый ряд технических отраслей промышленности испытывает потребность в титановом сырье. Важнейшим продуктом химической промышленности является диоксид титана, применяемый в частности, для получения лакокрасочных, абразивных, износостойких материалов.

Россия располагает одной из крупнейших в мире, разнообразной по видам сырья, минерально-сырьевой базой титана. По запасам титана уникальным является Ярегское нефтетитановое месторождение, в котором рудоносными являются лейкоксен-кварцевые песчаники, пропитанные высоковязкой нефтью (битумом). Лейкоксен представляет собой агрегаты микрокристаллов титановых минералов (рутил, анатаз) и кварца, находящихся в тонком прорастании [1]. Обилие в рудном материале кремнезема, трудноотделимого от диоксида титана, является фатальным обстоятельством для промышленного освоения месторождения.

К классическим методам получения пигментного диоксида титана относятся два технологических процесса: сернокислотный и хлоридный. Высокая стоимость переработки, целесообразность использования высокотитанистых концентратов (рутиловых, анатазовых) и применение опасных реагентов в хлоридном процессе, необходимость утилизации больших объемов отходов (сульфатов железа, кремнеземистых соединений), получаемых при переработке по сернокислотному способу, образование газовых, жидких и твердых производственных сбросов, а также большие энергетические затраты являются существенными недостатками применяемых процессов.

Актуальность работы диктуется необходимостью разработки нового экологически чистого и рентабельного способа переработки титанового сырья с комплексным извлечением редких, редкоземельных металлов, получением порошков кремния.

В последнее время принимает все большее развитие переработка минерального сырья с использованием фторидов. Еще недавно фториды использовали, в основном, в атомной промышленности для производства гексафторида урана, а в настоящее время крупнейшей областью использования фторидных технологий является производство фторполимеров. Широкое внедрение фторидных технологий в промышленное производство возможно только с развитием концепции замкнутого фторидного цикла, где фториды будут являться реагентом, в среде которых происходит химический процесс с исключением их расходов [2].

В Институте геологии Коми НЦ УрО РАН разрабатывается новая технология обескремнивания лейкоксена с применением фторидных компонентов, в основе которой лежит предложенная В.А.Карелиным технологическая схема фторирования ильменитовых шлаков [3]. В основу процесса переработки минерального сырья с помощью фторидов положены различия свойств фторидных соединений. Варьируя различиями в физико-химических свойствах фторидов, можно подобрать режимы для полного разделения минеральной смеси на индивидуальные компоненты. Развитие технологий фторирования идет по пути совершенствования реакций с участием фтора, фтористого водорода и фтористоводородной кислоты.

Наиболее перспективным фторирующим реагентом является гидрофторид аммония, представляющий собой инертное кристаллическое вещество. В обычных условиях гидрофторид аммония по сравнению с фтором, фтористым водородом и фтористоводородной кислотой не представляет существенной экологической опасности и становится эффективным фторирующим реагентом при нагревании.

Объектом исследования являлся лейкоксеновый концентрат Ярегского месторождения, очищенный от включений и агрегатов по ситу –1 мм. Минеральный состав концентрата представлен в основном кварцем и рутилом.

При фторировании гидрофторидом аммония ($NH_4HF_2$) лейкоксенового концентрата происходят следующие реакции взаимодействия основных минеральных компонентов и примесей с реагентом:

$TiO_2 + 3NH_4HF_2 = (NH_4)_2TiF_6 + 2H_2O + NH_3$

$SiO_2 + 3NH_4HF_2 = (NH_4)_2SiF_6 + 2H_2O + NH_3$

$Fe_2O_3 + 6NH_4HF_2 = 2(NH_4)_3FeF_6 + 3H_2O$

$Al_2O_3 + 6NH_4HF_2 = 2(NH_4)_3AlF_6 + 3H_2O$

$CaO + NH_4HF_2 = 2CaF_2 + H_2O + NH_3$

$K_2O + NH_4HF_2 = 2KF + H_2O + NH_3$

Исходя из уравнений химических реакций для основных оксидов кремнисто-титанового концентрата, были проведены расчеты массовых соотношений исходных компонентов. Для детального рассмотрения влияния количества фторирующего компонента на степень вскрытия, были взяты следующие соотношения лейкоксена и гидрофторида аммония: 1:1, 1:1,5, 1:2. Навески компонентов взвешивали на аналитических весах ALC–210d4, смесь предварительно растирали в ступке. После тщательного перемешивания образцы в стеклоуглеродных тиглях помещались в муфельную печь.

Для выявления механизма взаимодействия лейкоксена с гидрофторидом аммония и выбора температурного режима проведения фторирования были исследованы кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Кривые были получены на приборе NETZSCH STA 409 PC/PG с повышением температуры от 25 до 400 °С. Скорость нагрева образцов 10 °С /мин.

По результатам ДСК (рис.1) был определен температурный режим фторирования образцов с временными выдержками при наблюдаемых тепловых эффектах. Скорость подъема температуры до 220°С составляла 10°С/мин, далее скорость нагрева до 300°С составляла 2 °С/мин с изотермической выдержкой на каждом участке в течение 30 минут.

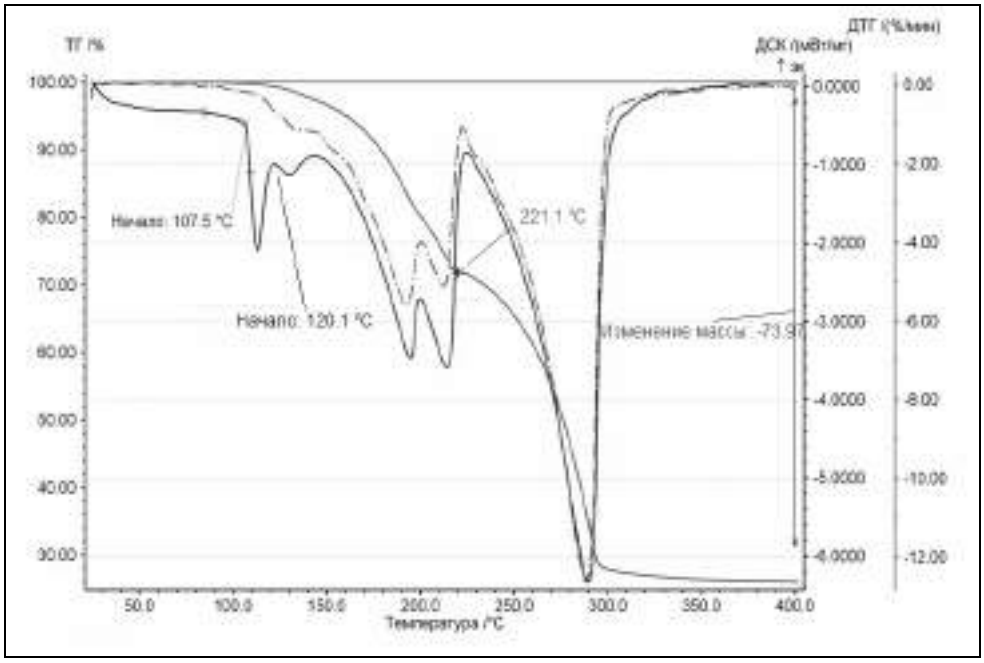



**Рис. 1. Кривая дифференциальной сканирующей калориметрии для смеси лейкоксена с гидрофторидом**

Методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии был установлен химический состав полученных продуктов в пересчете на высшие оксиды (табл. 1). Основными компонентами после фторирования являются оксиды $TiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$, $SiO_2$. Более полное вскрытие происходит при соотношении лейкоксена к гидрофториду аммония равном 1:1,5, с которым и были продолжены дальнейшее работы.

Таблица 1. Данные рентгенофлуоресцентного анализа

| Образец | Содержание оксидов, масс. % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $TiO_2$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $ZrO_2$ | CaO | $K_2O$ | $Y_2O_3$ | $Nb_2O_5$ |
| ***Исходный лейкоксен*** | 56,52 | 36,17 | 3,44 | 2,87 | 0,17 | 0,13 | 0,63 | 0,03 | 0,04 |
| 1 : 1 | 79,36 | 5,61 | 9,47 | 2,87 | 1,63 | 0,16 | 0,75 | 0,05 | 0,11 |
| 1 : 1,5 | 85,73 | 0,80 | 8,90 | 2,57 | 0,50 | 0,13 | 1,22 | 0,03 | 0,12 |
| 1 : 2 | 82,47 | 6,88 | 4,04 | 4,45 | 1,28 | 0,07 | 0,71 | – | 0,10 |

Для определения кристаллической структуры и минерального состава получаемого продукта реакции использовали рентгенофазовый анализ (РФА). Рентгенограммы получены по методу порошка на рентгеновском дифрактометре XRD-6000 фирмы SHIMADZU, с излучением Cu $K_\alpha$, в интервале углов отражения 2θ от 5 до 60. Минеральный состав, по данным РФА, представлен преимущественно фазами рутила и анатаза, с незначительным количеством кварца, оставшимся, очевидно в виде микроскопических, невскрытых включений (рис. 2). Расшифровку рентгенограмм проводили с использованием кристаллографической базы для минералов и их структурных аналогов МИНКРИСТ [4].

Проведенная дифференциальная сканирующая калориметрия чистых образцов оксидов $TiO_2$, $SiO_2$ с гидрофторидом аммония (ГДФА) позволила установить, что механизм взаимодействия составляющих минералов (оксидных форм) с ГДФА протекает ступенчато. При взаимодействии оксида кремния с ГДФА (рис. 3) при температуре 120°С наблюдается плавление и начало возгонки избыточного ГДФА в виде газообразного аммиака и фтороводорода (суммарная потеря массы

15 %). В результате нагревания свыше 220 °С первоначальный комплекс кремния $(NH_4)_2SiF_6 \cdot NH_4F$ разлагается до $(NH_4)_2SiF_6$ и сублимируется при температуре 290°С (с суммарной потерей массы в 85 %). При взаимодействии оксида титана с ГДФА (рис. 4) образование фторидного комплекса титана начинается с 250 °С и продолжается до 307 °С. Далее гексафторотитанат аммония сублимируется в виде $TiF_4$.

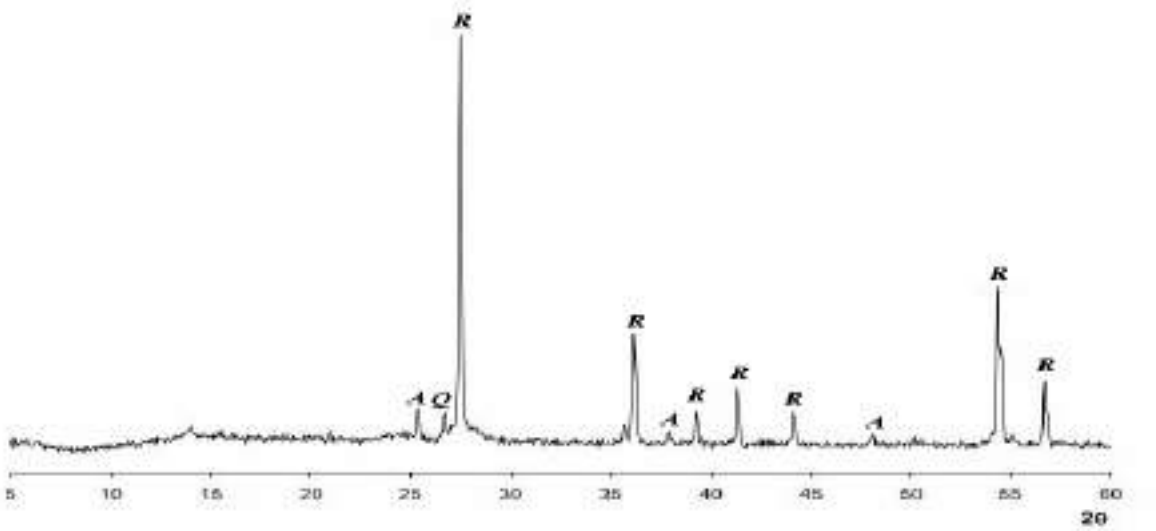



**Рис. 2. Рентгенограммы продукта обескремнивания лейкоксена (А – анатаз, R – рутил, Q – кварц)**

Также одной из целей нашей работы являлось изучение влияния механообработки лейкоксена на повышение его реакционной способности при химическом разложении и синтезе продуктов.

Как уже отмечалось, исходный лейкоксеновый концентрат имеет микроагрегатное, поликристаллическое строение; составляющие его минеральные оксиды титана, кремния, железа и других соединений находятся в тесном срастании между собой. По данным оптической и электронной микроскопии, средний размер кристаллов минералов, слагающих агрегат лейкоксена, находится в диапазоне 1–50 мкм.

Для исследования влияния механоактивации на степень вскрытия лейкоксенового концентрата были использованы несколько видов подводимого напряжения для разрушения агрегатных зерен лейкоксена. В качестве механических устройств использовались дезинтегратор (ДСЛ–115, конструкции Таллинского технического университета) и центробежный истиратель (ЦИ–03).

Центробежное измельчение представляет собой совокупное действие на вещество сжимающих, растягивающих и сдвиговых (срезающих) усилий. Реализация сдвиговых усилий сводит к минимуму затраты на кинетическую энергию.

Активация исходного лейкоксена была проведена тремя способами. В центробежном истирателе материал истирался в течение 30 минут, в дезинтеграторе – измельчался за 1 проход (1-кратная дезинтеграция) и за 2 прохода (2-кратная дезинтеграция). Методом седиментационного анализа был определен гранулометрический состав полученных продуктов. Спекание механоактивированного лейкоксена с гидрофторидом проводили при температуре в 220 и 300 °С с изотермической выдержкой в течение 30 минут. По окончании фторирования проводили водное выщелачивание для перевода неразложившихся фторидных комплексов кремния и титана в раствор. В дальнейшем растворы подвергались гидролизу. Количественная оценка извлечения кремния из концентрата проводилась методом рентгенофлуоресцентного анализа отфильтрованного осадка, результаты приведены в табл. 2.

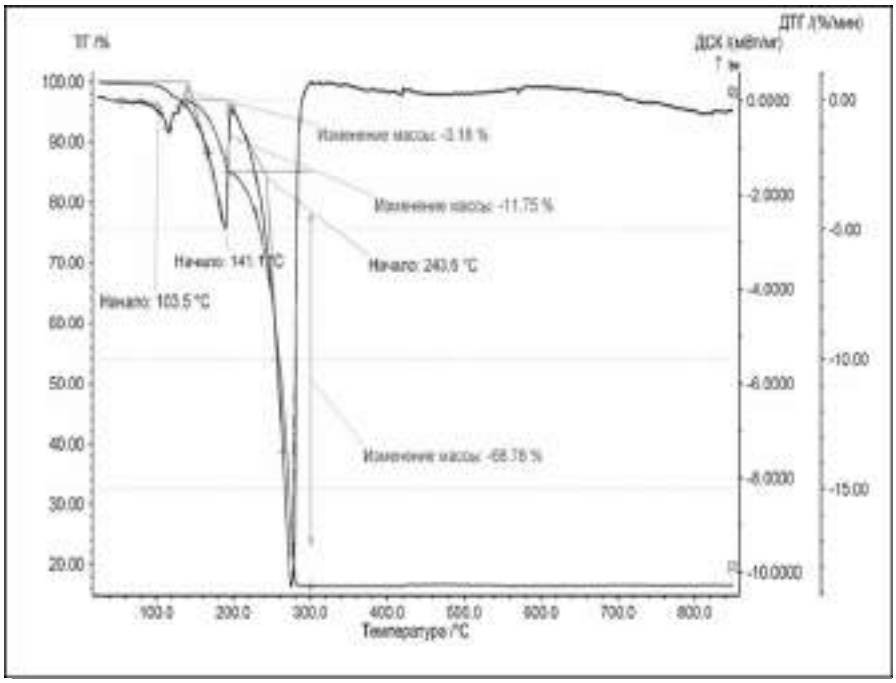



**Рис. 3. Кривая дифференциальной сканирующей калориметрии для смеси оксида кремния с гидрофторидом**

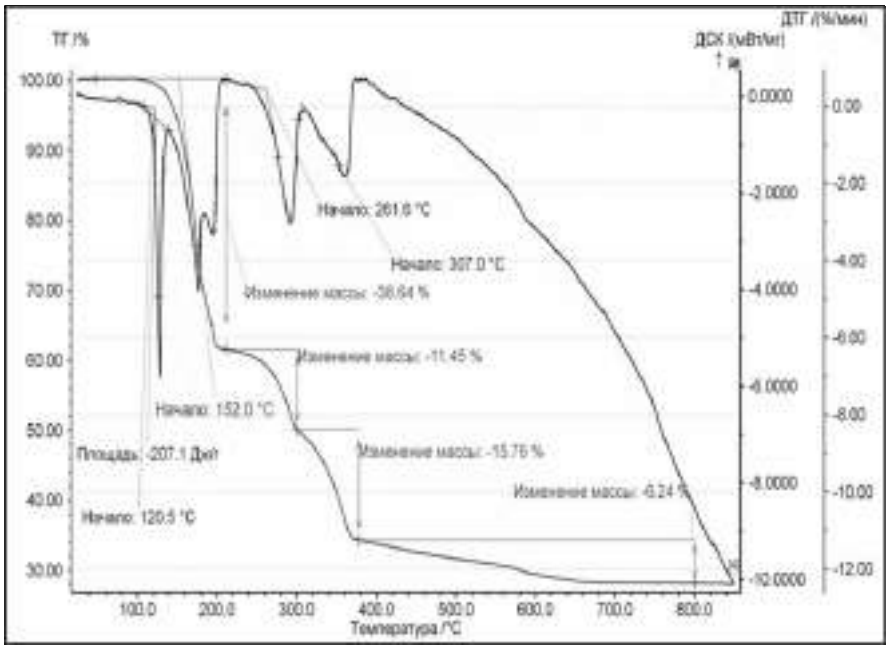



**Рис. 4. Кривая дифференциальной сканирующей калориметрии для смеси оксида титана с гидрофторидом**

Дезинтеграторы относятся к аппаратам ударного действия, в результате которого вся запасенная кинетическая энергия переходит в энергию деформации, разрушения и кинетическую энергию продуктов разрушения. Уровень энергии разрушения определяется ее максимальным значением, необходимым для разрушения самых прочных компонентов.

Таблица 2. Химический состав (в пересчете на оксиды) минерального сырья

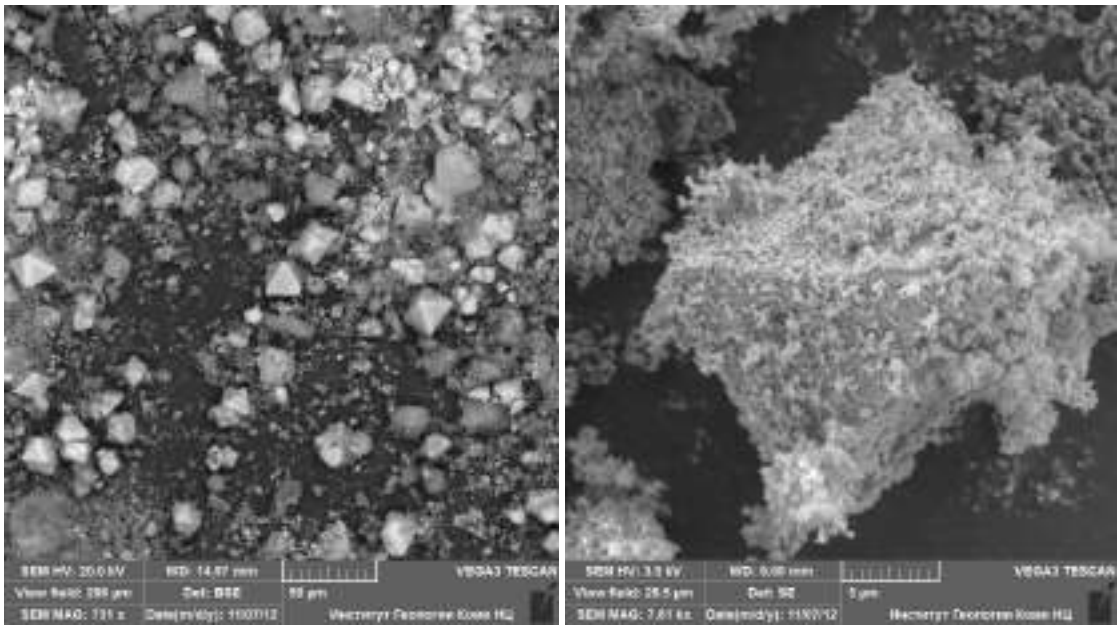
| Образец | Содержание оксидов, масс. % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $TiO_2$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $ZrO_2$ | CaO | $K_2O$ | $Y_2O_3$ | $Nb_2O_5$ |
| Исходный лейкоксеновый концентрат | 56,52 | 36,17 | 3,44 | 2,87 | 0,17 | 0,13 | 0,63 | 0,03 | 0,04 |
| Концентрат после обескремнивания (однократная дезинтеграция) | 75,92 | 12,18 | 6,94 | 3,08 | 1,01 | 0,18 | 0,53 | 0,04 | 0,12 |
| Концентрат после обескремнивания (двукратная дезинтеграция) | 78,56 | 7,84 | 8,93 | 3,19 | 0,92 | 0,19 | 0,22 | 0,04 | 0,11 |
| Концентрат после обескремнивания (измельчение в центробежном истирателе) | 82,23 | 5,28 | 7,75 | 2,71 | 1,10 | 0,21 | 0,55 | 0,06 | 0,11 |

Как видно, центробежное измельчение более эффективно, по сравнению с ударной дезинтеграцией, активирует лейкоксеновый концентрат и позволяет получать высокотитановые (свыше 80 % $TiO_2$) концентраты. В то же время ударные дезинтеграторы являются намного более производительными устройствами. В обоих случаях фиксируется накопление в продуктах фторирования редких металлов и редких земель, что может свидетельствовать о сходном характере поведения в технологическом процессе титановых и редкометалльных, редкоземельных минералов. Методом контролируемого гидролиза из фильтратов был получен гидратированный осадок. После фильтрации и прокаливании осадка при температуре 450 °С в течении 30 минут методом рентгенофлуоресцентного анализа было определен состав порошка. Основными компонентами его являются кремний и титан, второстепенными – железо и алюминий (табл. 3). Рентгеноструктурный анализ показал наличие анатазной формы титана и присутствие рентгеноаморфного кремнезема.

Под электронным микроскопом гидратированные осадки выглядят как смеси хорошо ограненных микрокристаллов (5–25 мкм) анатаза и более мелких зерен кварца (рис. 5 а, б).

Таблица 3. Химический состав гидратированных осадков

| Образец | Содержание оксидов, масс. % | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $TiO_2$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ |
| Продукт 1 (однократная дезинтеграция) | 24,67 | 69,37 | 1,55 | 4,41 |
| Продукт 2 (двукратная дезинтеграция) | 27,73 | 61,71 | 3,37 | 7,19 |
| Продукт 3 (центробежное истирание) | 43,55 | 49,52 | 2,81 | 4,12 |



а б

**Рис. 5. Вид осадка под электронным микроскопом: а – общий вид; б – кристалл анатаза**

## Заключение

Разработана и отработана в лабораторных условиях методика обескремнивания лейкоксеного концентрата с использованием гидрофторида аммония. При помощи фторидных технологий возможно получение из ярегских лейкоксеновых концентратов высокотитановых продуктов, удовлетворяющих требованиям основных промышленных потребителей данного сырья.

Установлено положительное влияние механоактивации на полноту вскрытия лейкоксенового концентрата. В результате механоактивации образуются центры, способствующие образованию фторидных комплексов, которые при термической обработке могут быть переведены в раствор.

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта фундаментальных исследований УрО РАН № 12-5-027-КНЦ.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатьев В.Д., Бурцев И.Н. Лейкоксен Тимана. Минералогия и проблемы технологии. СПб: Наука, 1997. 215 с.
2. Андреев А.А., Дьяченко А.Н., Крайденко Р.И. Фториды аммония в технологии переработки минерального сырья // Фторидные технологии: сб. тез. докл.всер.научно-практической конференции. Томск: ТГПУ, 2009. С. 87.
3. Карелин В.А., Карелин А.И. Фторидная технология переработки концентратов редких металлов // Отв. ред. В.А.Матюха. Томск: НТЛ, 2004. 221 с.
4. МИНКРИСТ // [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://database.iem.ac.ru/mincryst/rus/search.php

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КВАРЦА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ

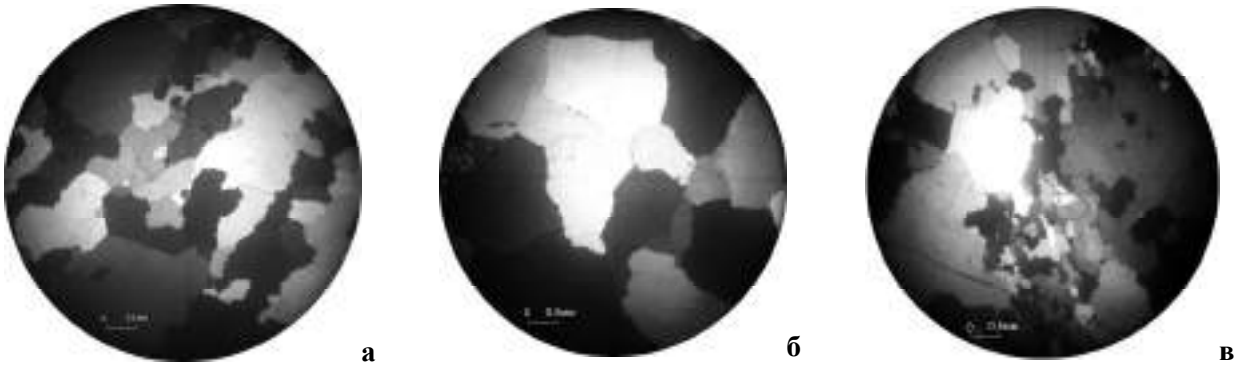
***Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.***

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Одним из наиболее перспективных объектов нетрадиционного кварцевого сырья на территории Карело-Кольского региона, является жильный кварц золоторудного месторождения Майское, которое расположено в Лоухском районе Карелии. Рудные тела сложены жильным кварцем с наложенной на него золото-сульфидной минерализацией. Многоэтапность формирования кварца в условиях невысоких температур (350–300°С), а также влияние метасоматической переработки на более поздних стадиях при общем снижении температур (до 220°С) [1] привела к перекристаллизации с образованием химически чистого кварца, о чем говорят данные содержания структурных примесей в кварце данного месторождения [2], которые значительно ниже таковых в гранулированном, стекловидном, молочно-белом кварце Карело-Кольского региона.

Предварительные минералого-технологические исследования кварца данного месторождения с целью определения возможностей получения высокочистого кварца (ВЧК) были проведены на образцах кварца, представленных А.В. Чернявским (ГИ КНЦ РАН).

Кварц по пробам варьирует от молочно-белого сливного (безрудный) до всех оттенков серого кварца, вплоть до темно-серого (кварц из «рудных столбов» с сульфидной минерализацией). Молочно-белый сливной кварц по шлифам характеризуется гетеробластовой структурой, сложенной как грануломорфными, так и изометричными, слегка вытянутыми зернами (рис. 1-а). Границы зерен ровные, ступенчатые, иногда угловатые, размер зерен – 0,2–1,4 мм до 4,5 мм по удлинению. В серовато-белом кварце зернистость проявлена довольно ясно, структура кварца гранобластовая, преобладают более крупные грануломорфные и изометричные, вытянутые зерна, размер – 2–5 мм (рис. 1-б). Границы зерен ступенчатые, угловатые, реже заливчатые. В темно сером сливном кварце зернистость проявлена слабо, структура кварца гетеробластовая. Зерна кварца грануломорфные (более мелкие 0,4–1,3 мм) и изометричные, слегка вытянутые (до 4,5 мм). Участками наблюдается скопления зерна кварца в виде гнезд, небольших линз с ответвлениями, которые образуют мелкозернистый агрегат зерен (2 генерация рекристаллизованного кварца), иногда мозаичной структуры (местами границы зерен размыты), размер зерен – 0,05–0,4 мм (рис. 1-в).



**а** **б** **в**

**Рис. 1. Фото шлифов кварца месторождения Майское (николи +): а — молочно-белый сливной, б — серовато-белый, в — темно-серый сливной**

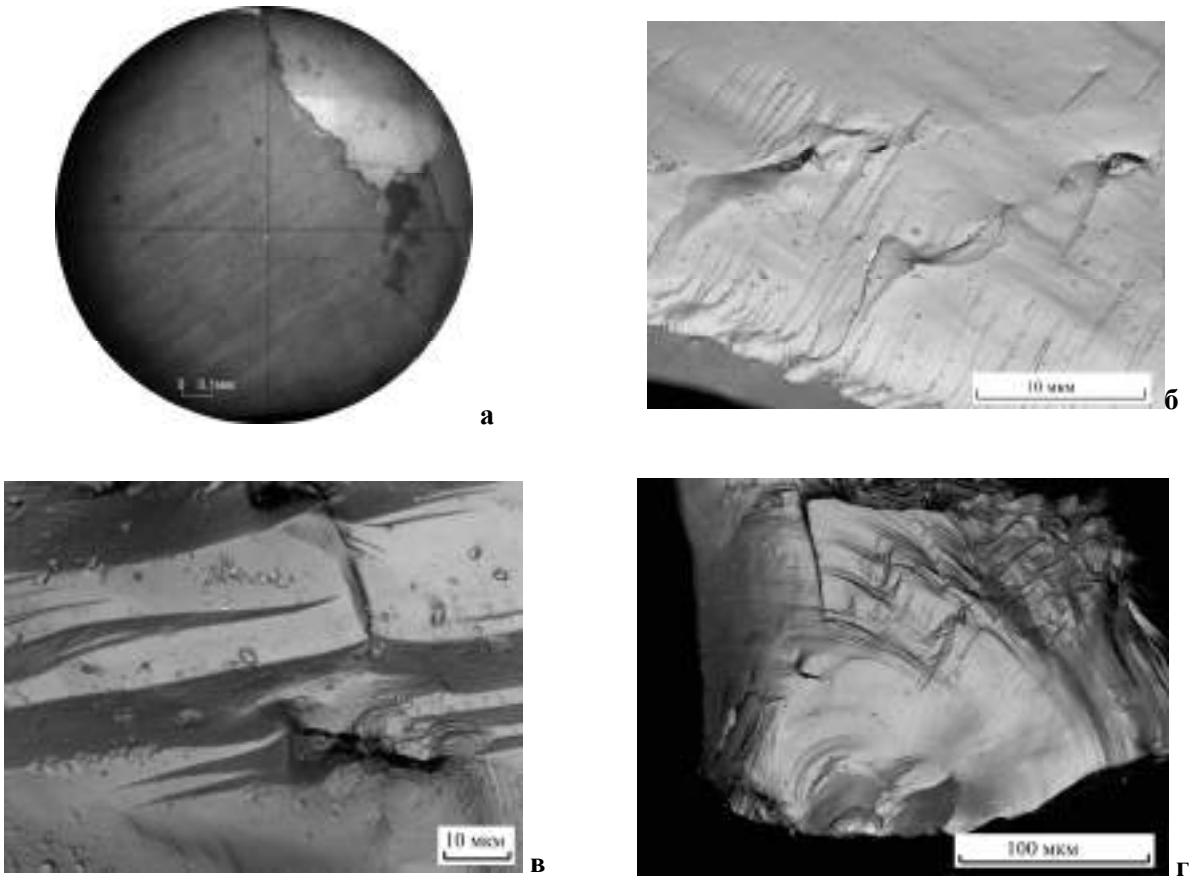



**Рис. 2. а – пластинки деформации (фото шлифа, николи +): б, в, г – микродеформации, выходящие на поверхность зерен кварца (фото с лазерного анализатора поверхности Color 3D Laser Microscope VK-9710K, Япония)**

В кварце 1 генерации довольно интенсивно проявлены деформационные структуры, что наблюдается по шлифам – пластинки деформации, единичные деформационные изгибы, иногда микроблокование, линейная блочность (рис. 2-а), так и на фото поверхности зерен кварца, где видны микродеформации (рис. 2-б-г), что говорит о высокой внутренней напряженности зерен кварца.

В качестве минеральных включений в кварце присутствуют кальцит, хлорит, биотит, серицит, анкерит, актинолит, альбит, по краям которого иногда наблюдаются каемки анортита, К-полевой шпат, внутри зерен которого иногда наблюдаются вростки Ва-содержащего К-полевого шпата, рутил (рис. 3, 4). Хлорит, кальцит, в меньшей степени серицит, развиваются по трещинкам, иногда образуя тесные срастания, в которых встречаются также включения рутила. Плагиоклаз (альбит) развивается вместе с кварцем второй генерации, образует микрогранулированный агрегат с зернами кварца, иногда в срастании с К-полевым шпатом, хлоритом, рутилом. Трудноудаляемыми минералами-примесями являются микровключения зерен кальцита (10–50 мкм), калиевого-полевого шпата (10–50 мкм), мусковита (10–60 мкм), хлорита (10–60 мкм), находящиеся внутри зерен кварца.

Исходный кварц характеризуется высоким содержанием таких элементов-примесей как Al, Na, K, Ca, Ti, Fe. Общая сумма примесей составляет 6650 ppm. Это связано с присутствием микроминеральных включений внутри зерен кварца.

Предварительные технологические исследования молочно-белого кварца месторождения Майское показали, что в составе крупки рабочей фракции 0,315–0,1мм присутствуют зерна, размер которых достигает 1мм (рис. 5).

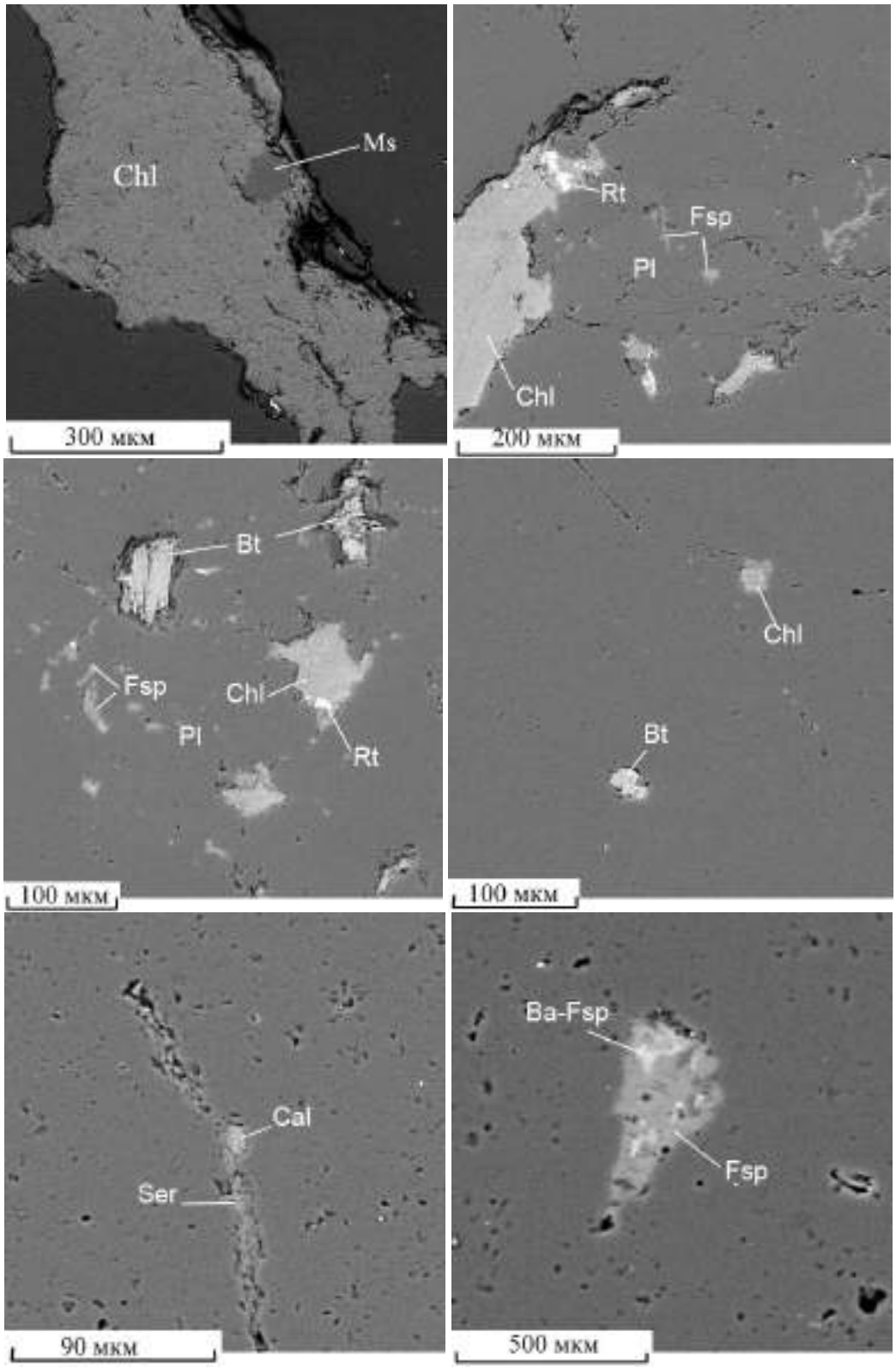



**Рис. 3. Нерудные включения в кварце: Chl – хлорит, Ser – серицит, Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Fsp – калиевый полевой шпат, Ba-Fsp – бариевый полевой шпат Rt – рутил, Cal – кальцит (СЭМ VEGA II LMU)**

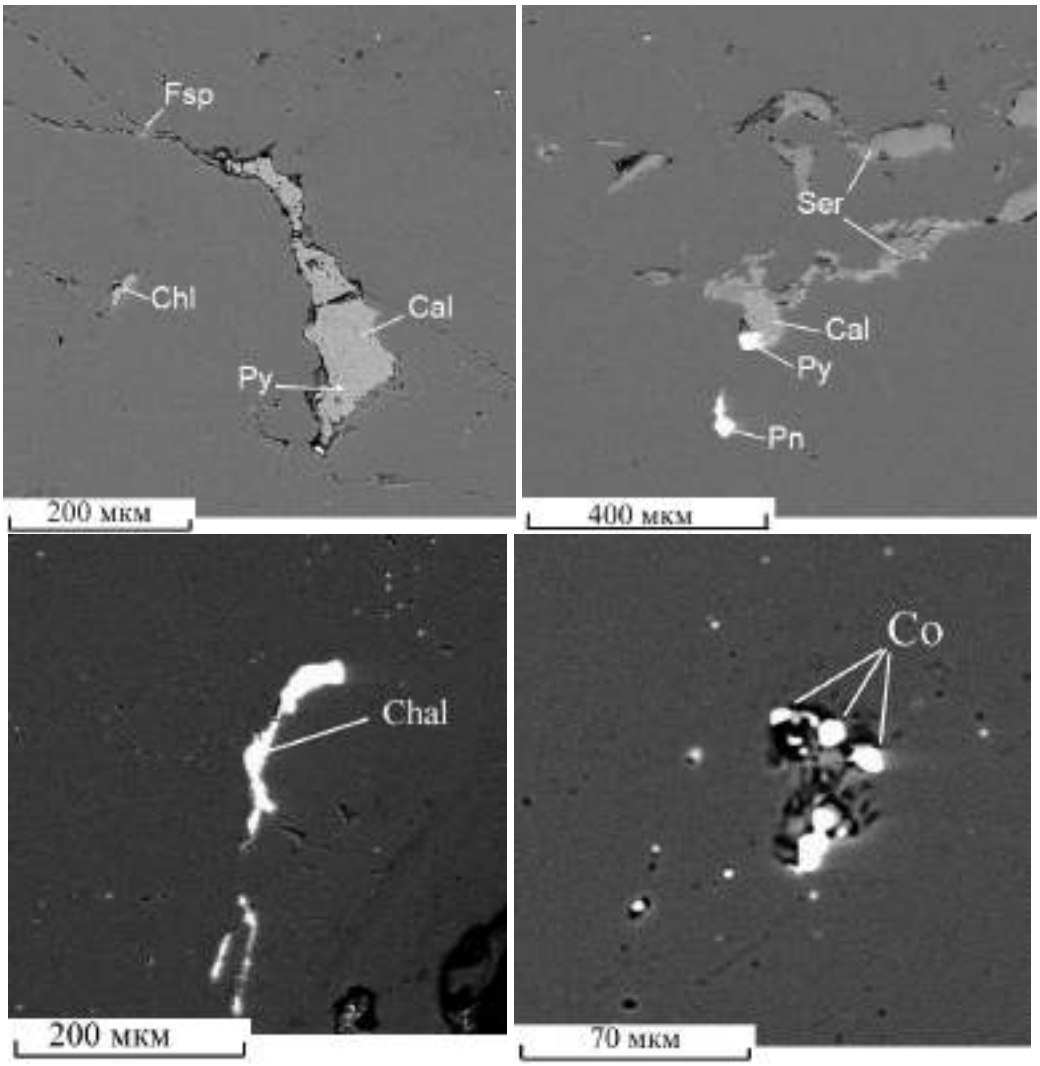



**Рис. 4. Рудные включения в кварце: Py – пирит, Pn – пентландит, Chal – халькопирит, Co – кобальтин (СЭМ VEGA II LMU)**

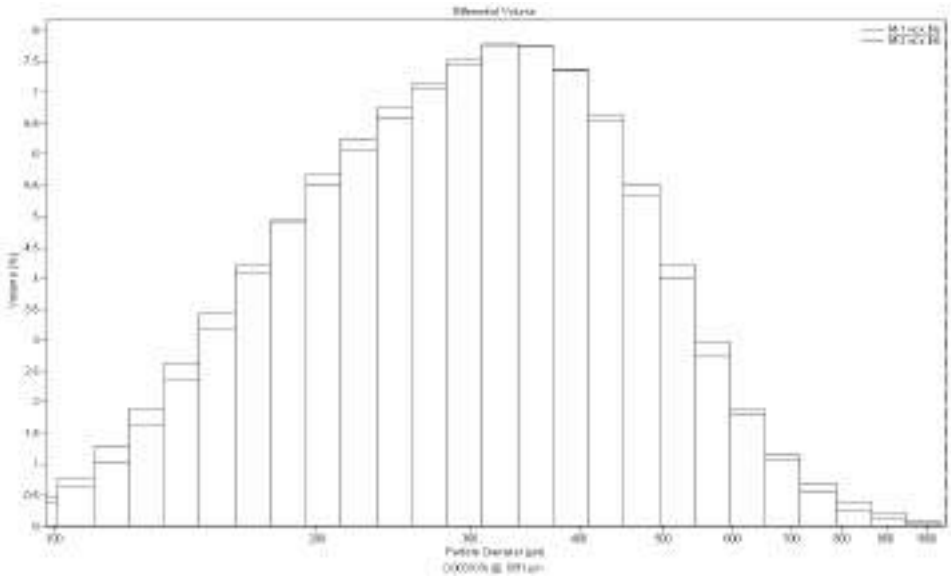


**Рис. 5. Анализ гранулометрического состава рабочей крупки на лазерном анализаторе частиц LS 13 320 компании «BECKMAN COULTER»**

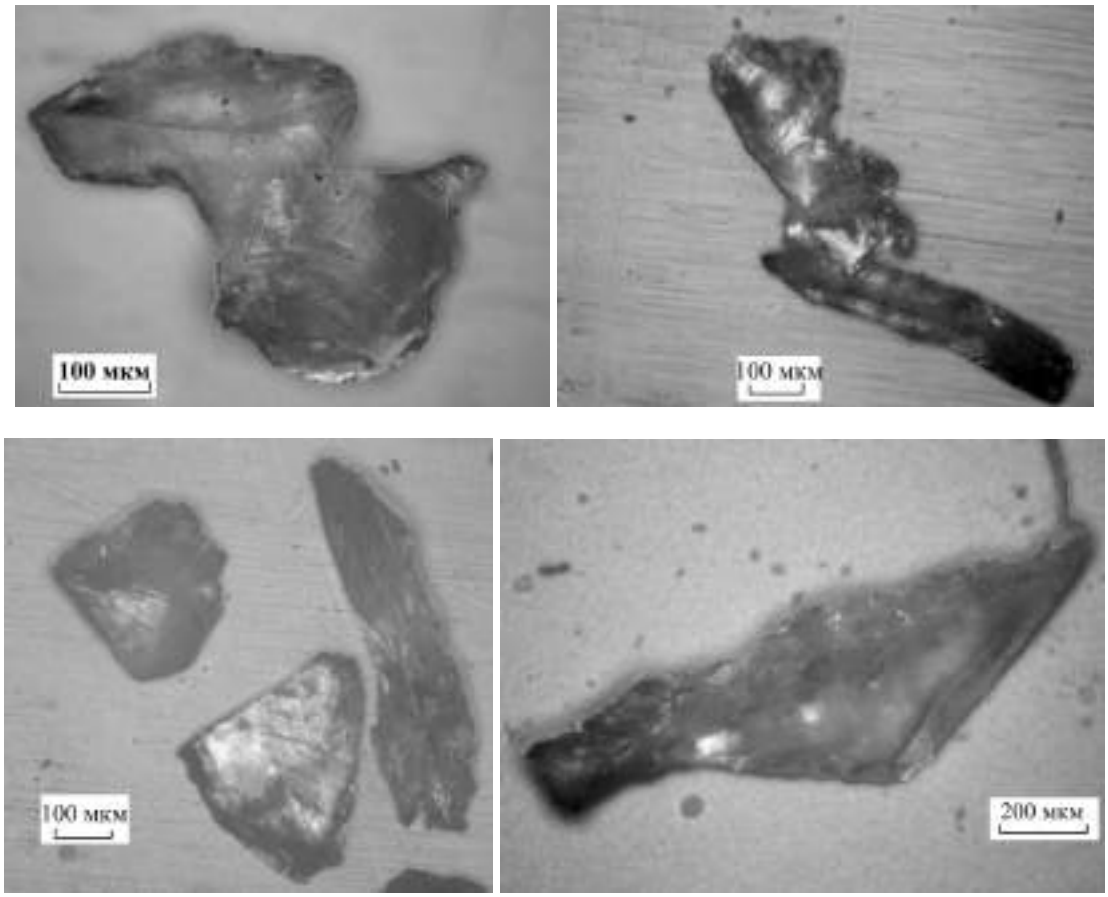



**Рис. 6. Форма зерен в крупке рабочей фракции (лазерный микроскоп Color 3D VK-9710K)**

Анализ зерен кварца рабочей крупки на лазерном анализаторе поверхности Color 3D Laser Microscope VK–9710K (Япония) показал, что присутствие зерен крупнее 0,315 мм обусловлено наличием лещадных и игловатых зерен (с коэффициентом удлинения 1:4 и более), образование которых в процессе измельчения связано с микродеформациями кварца (рис. 67).

Проведенные предварительные технологические исследования молочно-белого кварца месторождения Майское показали, что при предварительном обогащении с использованием магнитной сепарации с напряженностью поля 1100кА/м с двумя перечистками количество примесей снижается в 7 раз, но остается достаточно высоким. Доводка в плавиковой кислоте позволяет довести степень обогащения до 39 и сумму примесей до 165 ppm, а увеличение числа травлений в кислоте до трех – до 63 ppm.

Использование физических методов направленного воздействия полями в процессе обогащения кварца пробы 56/4 позволило получить на крупке 0,315–0,1 мм более качественные концентраты с суммарным содержанием элементов-примесей в кварце на уровне 33 ppm (табл. 1).

В конечном кварцевом концентрате остаются повышенные содержания Na, K, Ca, Fe, что может быть связано с присутствием неудалившихся микровключений минералов (рис. 6), а также с присутствием эмульсионных включений сульфидов меди. Колебания содержания меди в концентрате косвенно говорит о неравномерном распределении сульфидов в кварце.

Проведенные предварительные минералогические исследования жильного кварца месторождения Майское показали, что для кварца данного месторождения характерно наличие большого количества минеральных примесей, размер которых варьирует в широких

пределах, вплоть до эмульсионных. Примеси, затрудняющие процессы обогащения, представлены кальцитом, альбитом, КПШ и мусковитом микронных размеров внутри зерен кварца.

Таблица 1. Содержание элементов-примесей в кварце месторождения Майское на различных стадиях обогащения, ppm

| Элемент | | Исходная крупка | Предварительное обогащение | | | Глубокое обогащение |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Концентрат после магнитной сепарации | Доводка в HF | Тройная доводка в HF | методы направленного воздействия, м/с +HF |
| | | 56/4-0 | 56/4-2 | 56/4-3 | 56/4-5 | 56/4-8 |
| Железо | Fe | 800 | 135 | 35 | 6.3 | 2.3 |
| Титан | Ti | 85 | 1.5 | 0.40 | 0.36 | 0.32 |
| Цирконий | Zr | 2.3 | 0.06 | 0.018 | <0.01 | <0.01 |
| Марганец | Mn | 4.4 | 1.1 | 0.055 | 0.021 | 0.026 |
| Алюминий | Al | 2600 | 260 | 16 | 11 | 10 |
| Медь | Cu | 590 | 85 | 40 | 6.8 | 0.9–5.8 |
| Цинк | Zn | 3.4 | 2.2 | 0.12 | 0.05 | 0.04 |
| Бор | B | — | ~0.5 | ~0.4 | 0.12 | 0.19 |
| Никель | Ni | 5.5 | 1.2 | 0.070 | 0.09 | 0.14 |
| Хром | Cr | 3.1 | 0.30 | 0.012 | 0.012 | <0.01 |
| Кобальт | Co | 4.1 | 1.2 | 0.16 | 0.40 | 0.16 |
| Кальций | Ca | 200 | 40 | 5.5 | 3.1 | 2.9 |
| Стронций | Sr | 4.2 | 0.70 | 0.16 | 0.045 | 0.052 |
| Барий | Ba | 17 | 1.1 | 0.34 | 0.19 | 0.26 |
| Магний | Mg | 18 | 13 | 1.1 | 0.44 | 0.65 |
| Натрий | Na | 770 | 300 | 11 | 6.0 | 7.6 |
| Калий | K | 1000 | 40 | 7.5 | 4.0 | 5.0 |
| Литий | Li | 1.5 | 0.13 | 0.05 | 0.043 | 0.04 |
| Германий | Ge | — | — | 0.15 | 0.16 | 0.17 |
| Фосфор | P | 14 | ~0.8 | 0.11 | <0.1 | <0.1 |
| Свинец | Pb | 1.3 | 0.7 | <0.03 | <0.03 | <0.03 |
| Ванадий | V | 3.4 | 0.22 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Сера | S | 430 | 78 | 52 | 8 | <2 |
| СУММА | | 6650,8 | 953,91 | 169,085 | 63,95 | 33,178 |
| Степень обогащения | | | 7 | 39,2 | 104 | 200,51 |

Примечание: анализы выполнены в лаборатории Курчатовского института (г. Москва) методом ICP MS

Предварительные технологические исследования показали, что в целом, кварц данного месторождения является перспективным объектом для получения высокочистого кварца (ВЧК).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольфсон А.А. Геолого-генетические особенности золото-кварцевого месторождения «Майское» (Северная Карелия): дис. канд. геол-мин. наук. М., 2004. 165 с.
2. Войтеховский Ю.Л., Лютоев В.П., Чернявский А.В. Золоторудный кварц из проявлений Пана-Куолаярвинской структуры // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов. Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции, посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26–29 сент. 2010 г., Апатиты: Изд-во К & М, 2010. С. 4–7.

# ОРГАНОГЛИНЫ. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

***Наседкин В.В.*** [1]***, Демиденок К.В.*** [2]***, Боева Н.М.*** [1]***, Лыгач В.Н.*** [3]***, Васильев А.Л.*** [4]***, Белоусов П.Е.*** [1]***, Покровская Е.В.*** [5]***, Гарбузова И.А.*** [6]***, Меренков А.М.*** [7]

[1]ИГЕМ РАН, Москва; nasdi@mail.ru
[2]ЗАО «МЕТАКЛЭЙ», Москва;
[3]ГИГХС, Люберцы;
[4]Курчатовский научный центр, Москва;
[5]ГИН РАН, Москва;
[6]Институт органических элементов РАН, Москва;
[7]ООО «Сахалинуголь», Южно-Сахалинск

В последнее десятилетие мировой объем потребления бентонитовой глины увеличился примерно в 1,5 раза не только за счет увеличения валового объема, но и за счет появления новых областей использования (рис. 1).

В настоящее время мировая добыча составляет порядка 16 млн т сырья. Наиболее широко бентонитовая глина используется как сорбент, в общей сложности это составляет около 24 % от общего объема добычи. Весьма важным направлением использования также является производство железорудных окатышей (16 %), формовочных смесей (10 %), разведочное и эксплуатационное бурение (8 %). К сравнительно новым, весьма перспективным направлениям, относится производство органоглин разного качества и назначения. В эту группу входят различного рода слоисто-силикатные нанокомпозиты, безводные литейные смеси, герметики, эксплуатационные нефтяные скважины и т.д. Рост потребления бентонитовой глины отчетливо набирает темп в производстве пластмасс, различного рода упаковочных материалов, строительных конструкций и т.д. [1].

В данное время основное количество пластмасс различного назначения производится в США, Японии, Германии, Китае. В 2010 г. объем производства пластмасс и их аналогов превысил 1 млрд т. (рис. 2). Для улучшения таких показателей, как прочность, огнестойкость, газопроницаемость, в некоторые виды пластмассы в настоящее время добавляется до 1–3 % органоглины. Использование органоглины в пластмассовом производстве может резко повысить производство бентонитов вообще.

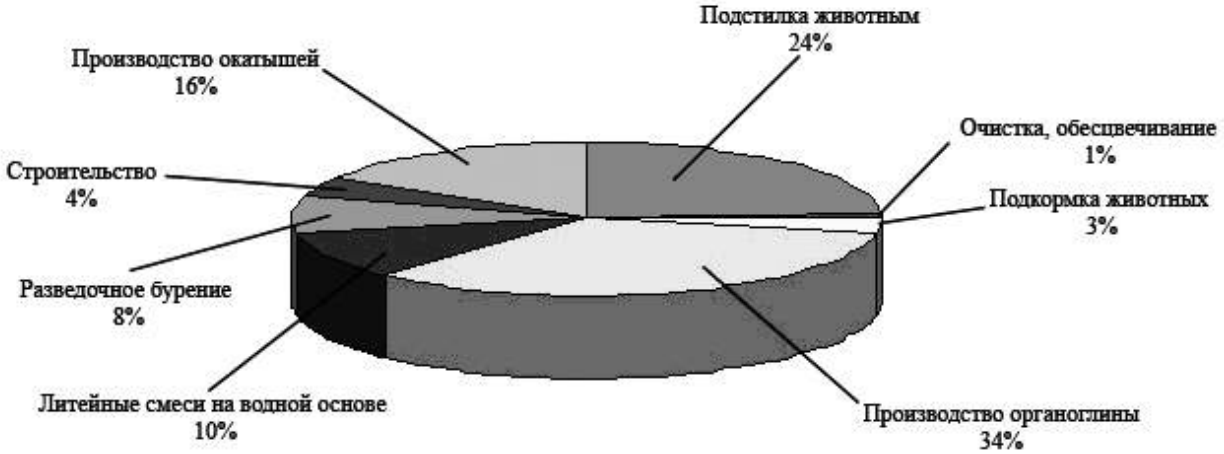



**Рис. 1. Области применения бентонита**

Производство и промышленное использование этого своеобразного материала, каким является органобентонит, в мировом плане имеет довольно длительную историю развития. Впервые в мировой практике органоглины начали использоваться в нефтяной и газовой промышленности еще в

70-е годы прошлого века. Использование органоглин в качестве структурообразователя буровых растворов на углеводородной основе при вскрытии продуктивных нефтяных и газовых пластов для повышения их дебита и качества извлекаемого продукта в настоящее время интенсивно продолжает развиваться в зарубежной практике и постепенно все более интенсивно внедряется в РФ [3]. При использовании для вскрытия продуктивных пластов скважинами с буровыми растворами на водной основе происходит снижение коллекторских свойств пород, образующих нефтяной пласт и резкое уменьшение дебита нефти из эксплуатационных скважин. Отрицательное влияние глинистых растворов на водной основе вызвано блокирующим влиянием обычных глинистых частиц, которые, будучи гидрофильными, проникая в поры и капилляры нефтеносных горных пород, благодаря способности к набуханию, полностью перекрывают поступление нефти и газа при эксплуатации соответствующих месторождений. В противоположность обычным бентонитам органоглины гидрофобны и не мешают миграции нефтяных и газовых потоков. В среднем на 1 м$^3$ раствора в данное время большинство фирм используют до 15–20 кг органобентонита.

Не менее длительную историю имеет опыт применения органобентонита при изготовлении лакокрасочных материалов (ЛКМ). Использование органобентонита в ЛКМ позволило резко улучшить их многие качественные показатели и в частности такие важные показатели, как тиксотропные свойства, увеличение седиментационной устойчивости и повышение стабильности при хранении, повышение укрывистости ЛКМ и снижение его расходов. Некоторые предприятия, использующие органобентонит в производстве ЛКМ, рекомендуют следующий способ его приготовления: вначале создается своеобразная паста из 100 кг растворителя и 60 кг органобентонита, затем паста разбавляется из расчета не менее 25–40 % по массе от общего веса ЛКМ. Следует подчеркнуть, что в США и вслед за ними в других странах введение органобентонита в ЛКМ началось еще в 1946 г. В РФ лаки и краски на основе ЛКМ с органобентонитом начали производиться только в 2000 г.

В данное время делаются попытки использовать органобентонит в формовочном деле при производстве точного литья, в составах антипригарных покрытий, в автомобильной промышленности при производстве уплотнительных мастик и клеев.

**Рис. 2. Мировое производство пластмасс**

## Органобентонит

Следует подчеркнуть, что в наиболее промышленно-развитых странах органобентонит в последние 5–6 лет используется достаточно интенсивно. Образно говоря, наблюдается своеобразный скачок в развитии производства органобентонита, что, по-видимому, связано с развитием принципиально нового направления в технологии, в основу которой положено использование в технике частиц наноразмерного уровня.

Частицы пылевидных фракций бесконечно малых по размеру глинистых частиц могут резко увеличить механические, термические, газопроницаемые и пламегасящие свойства многих видов пластмасс. Установлено, что порядка 2–5 % по весу наноразмерных глинистых частиц, диспергированных в пластмассы, могут способствовать огромному по величине улучшению качества без значительного возрастания плотности или уменьшения прозрачности материала.

За рубежом органоглины называют бентонами. Органобентонит (бентон) представляет собой продукт взаимодействия естественных монтмориллонитовых глин (бентонитов) с олеофилизаторами, в частности, с четвертичными аммониевыми солями (ЧАС), и является универсальным структурообразователем масляных сред. Попадая в такую среду, он придает ей тиксотропность, является загустителем.

По данным фирмы ООО «КОНСИТ-А», проводившей несколько лет назад изучение рынка сбыта органобентонита, в некоторых отраслях промышленности была проявлена определенная заинтересованность в производстве этого материала не только за рубежом, но и в РФ (рис. 3).

Возвращаясь к производству пластмасс полимерной промышленности вообще, следует подчеркнуть, что частицы пылевидных фракций бесконечно малых по размеру глинистых частиц могут резко увеличить механические, термические, газопроницаемые и пламегасящие свойства многих видов пластмасс.

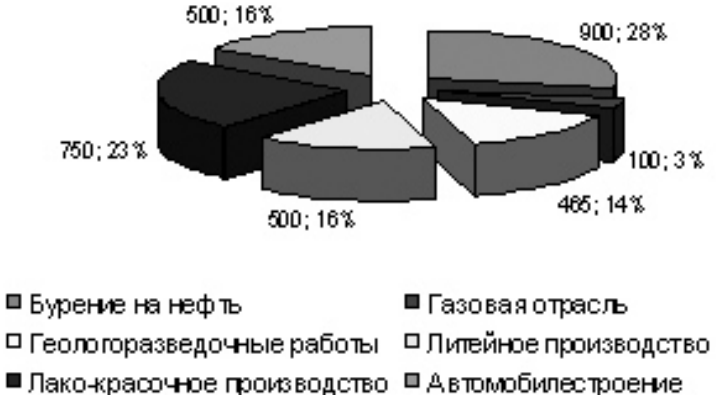



**Рис. 3. Возможные направления промышленного использования нанонаполнителя в РФ (по данным опроса)**

В последние годы большинство исследований были сконцентрированы на изделиях, связанных с автомобилестроением и упаковочными материалами, где главной целью было повышение физических и термических свойств пластмасс и ограничение проницаемости по отношению к газам, влаге и углеводородам.

Широкое использование бентонитов в нанотехнологиях в значительной степени связано с тем, что главный минерал смектитов – монтмориллонит относится к классу природных наночастиц. В поперечнике его параметры не превышают 20–100 нм, в толщину 10–15 нм.

## Структурные и физико-химические особенности монтмориллонита, используемого для производства органоглины

Бентониты – тонкодисперсные глины, состоящие не менее, чем на 70 % из минералов группы смектита (монтмориллонита, бейделлита, нонтронита, сапонита). Смектиты являются наиболее походящими минералами среди слоистых силикатов для образования органоглин (рис. 4).

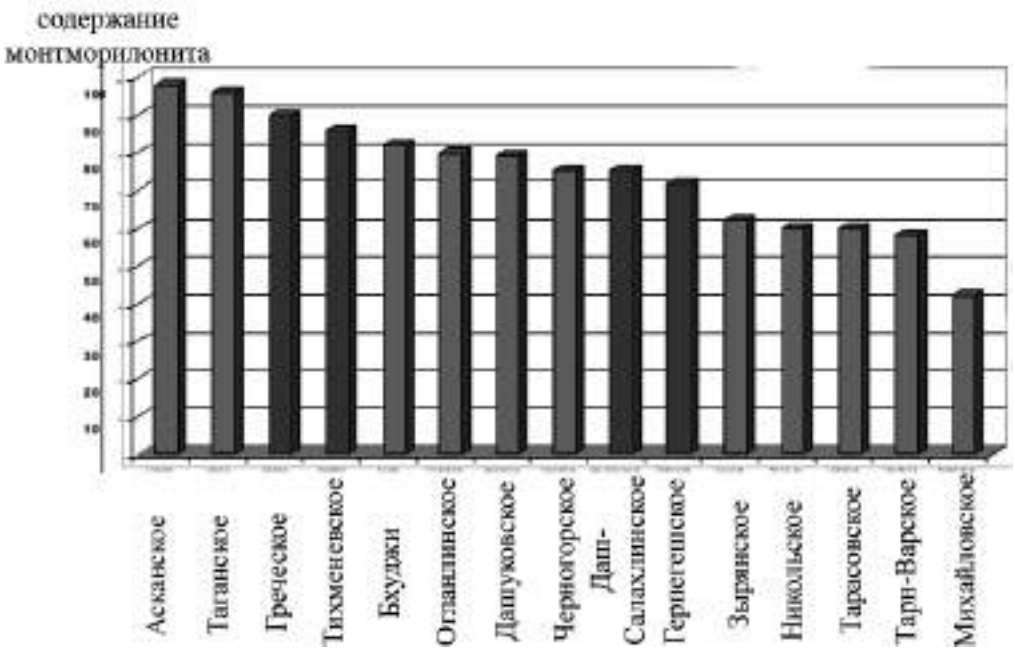



**Рис. 4. Содержание монтморилита в бентонитах, пригодных для образования органоглин из разных месторождений [2]**

Структура монтмориллонита представляет собой трёхслойный пакет (2:1): два слоя кремнекислородных тетраэдров, обращённые вершинами друг к другу, с двух сторон покрывают слой алюмогидроксильных октаэдров (рис. 5). Толщина элементарного пакета составляет 0,96 нм. Пакеты в свою очередь группируются в частицы (рис.6).

В промежутках между пакетами монтмориллонита располагаются катионы металлов ($Na^{+1}$, $Li^{+1}$, $Ca^{+2}$, K, Mg и иногда группа $NH_3$), уравновешивающие отрицательный заряд слоев. В зависимости от преобладания одного обменного катиона, например, $Na^{+}$, или группы катионов ($Ca^{+}$-, $Mg^{+)}$ в природе встречаются натриевый ($Na^{+}$) и кальциево-магнезиальный ($Ca^{+}$-, $Mg^{+}$) монтмориллониты соответственно. Помимо обменных катионов, в межслоевом пространстве всегда присутствуют молекулы связанной воды [4].

Катион $Na^{1+}$ наиболее эффективно замещается четвертичным аммонием по сравнению с другими металлами. Крайне желательно отсутствие смешанослойных K-содержащих минералов, а также кварца и других минералов из группы кремнезема.

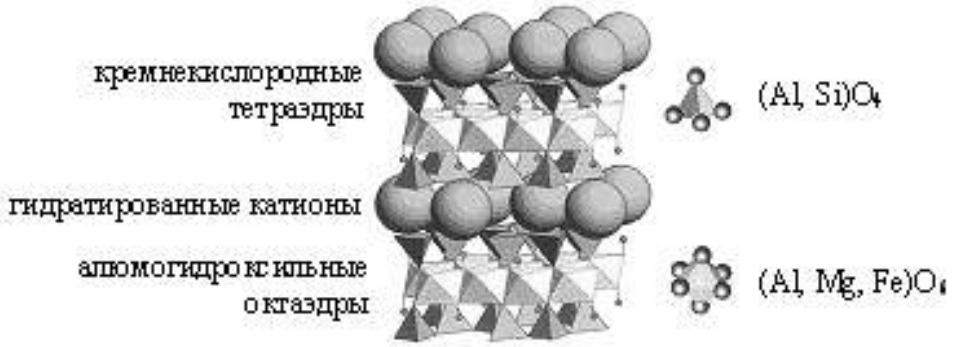



**Рис. 5. Структура монтмориллонита (Linda B. Williams)**

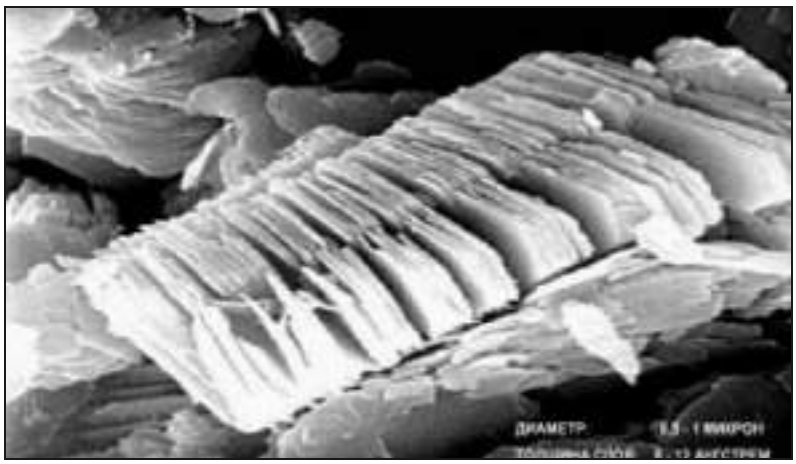



**Рис. 6. Электронно-микроскопический снимок. Пакеты (кристаллиты) монтмориллонита, группирующиеся в частицы**

Все глинистые минералы обладают определенной емкостью катионного обмена. Эта величина является важной характеристикой минерала и обозначает количество обменных катионов (выраженное в мг-эквивалентах), способных к замещению на катионы другого типа в расчете на 100 г глины. Монтмориллонит обладает самой высокой среди глинистых минералов емкостью катионного обмена (до 90–120 мг.экв/100 г сухой глины).

Органобентонит является химическим реагентом. В настоящее время идет активная разработка ПАВов со специфическими свойствами для различных отраслей промышленности. Рассмотрим наиболее распространенный вид ПАВа – четвертичные соли аммония.

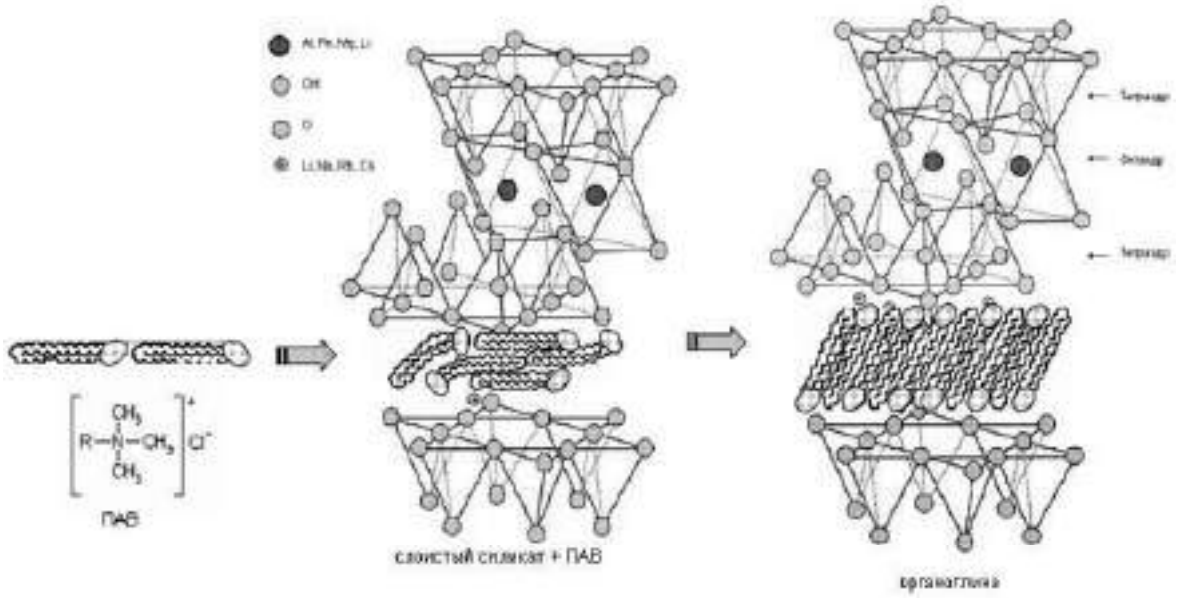
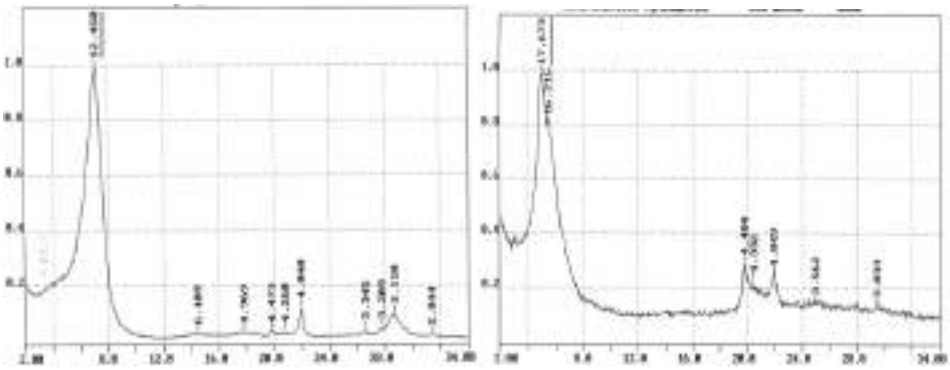



**Рис. 7. Схема органомодификации монтмориллонита**

Наиболее употребительный метод модификации – алкиламмоний-ионный обмен. Четыре лиганда прикреплены к атому азота и, по крайней мере, хотя бы одна представлена гидроуглеродом (алкил). Общий заряд иона алкиламмониума – положительный. Когда обменные катионы природной глины замещаются ионом алкиламмония, поверхность слоя становится более гидрофобной и совместимой с полимером и внутрислоевое пространство расширяется для смешения с ним (рис. 7).



а б

**Рис. 8. Дифрактограммы бентонитов: а – природный бентонит; б – органомодифицированный бентонит**

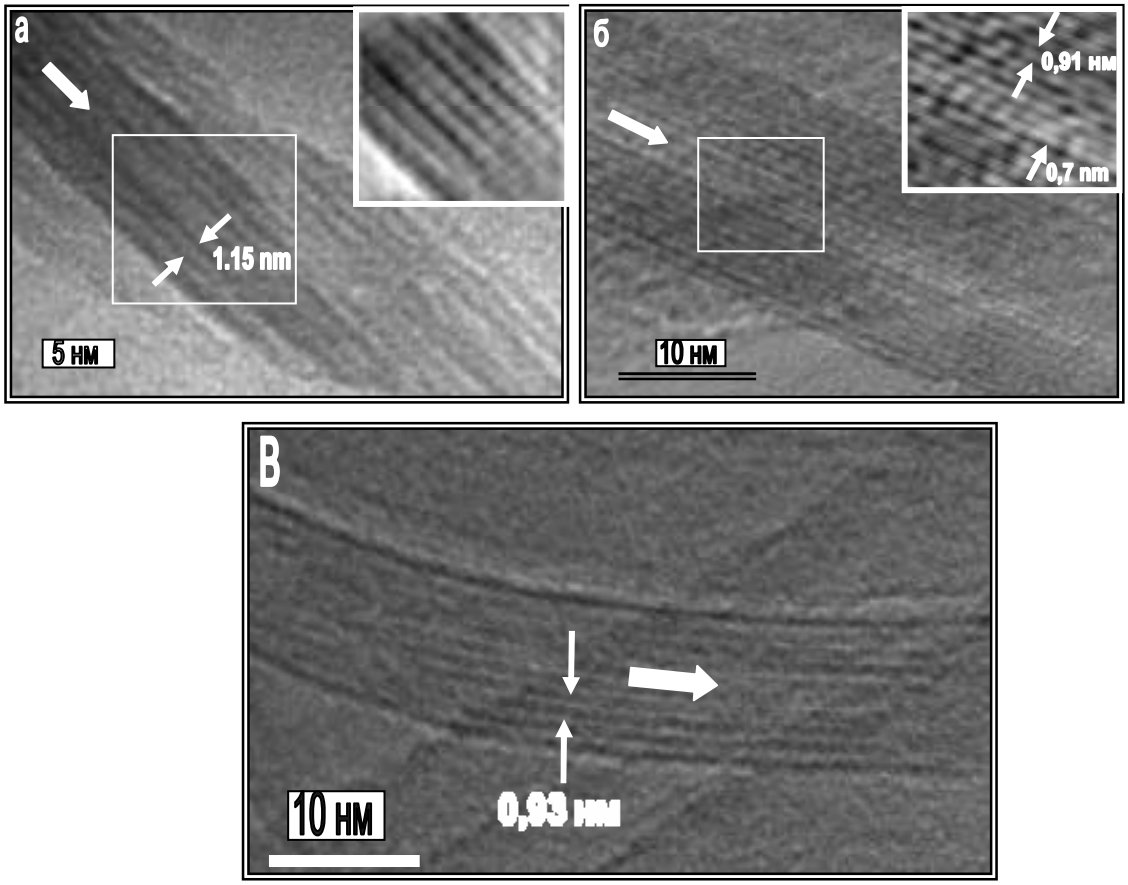



**Рис. 9. Дефекты кристаллической решетки нанонаполнителя. Наблюдается изменение параметров в расположении тетраэдрических слоев, изгибы слоев и т.д**

Катионы металлов, находящиеся в природном минерале, могут заменяться на другие ионы при проведении реакции ионного обмена.

Как отсюда следует, четвертичные алкиламмониевые катионы могут вытеснять ионы $Na^+$ с обменных позиций в монтмориллоните, причем увеличение числа углеродных атомов в неполярных алифатических группах способствует более эффективному вытеснению межслоевых катионов. В связи с этим, чаще всего в качестве модификаторов поверхностных свойств глины используют катионные поверхностно-активные вещества (ПАВ), в которых число углеродных атомов колеблется от 6 до 20 [5].

Качество органомодифицированной глины зависит не только от состава ПАВ, но и от качества самих глинистых частиц. Если в исходном сырье имеются дефекты кристаллической решетки монтмориллонита (изгибы слоев, микросбросы, разрывы октаэдрических и тетраэдрических слоев, образование выпуклых и вогнутых поверхностей), то нарушается их плотная упаковка и соответственно, это может отрицательно влиять на качество конечного продукта – органоглины (рис. 9, 10).

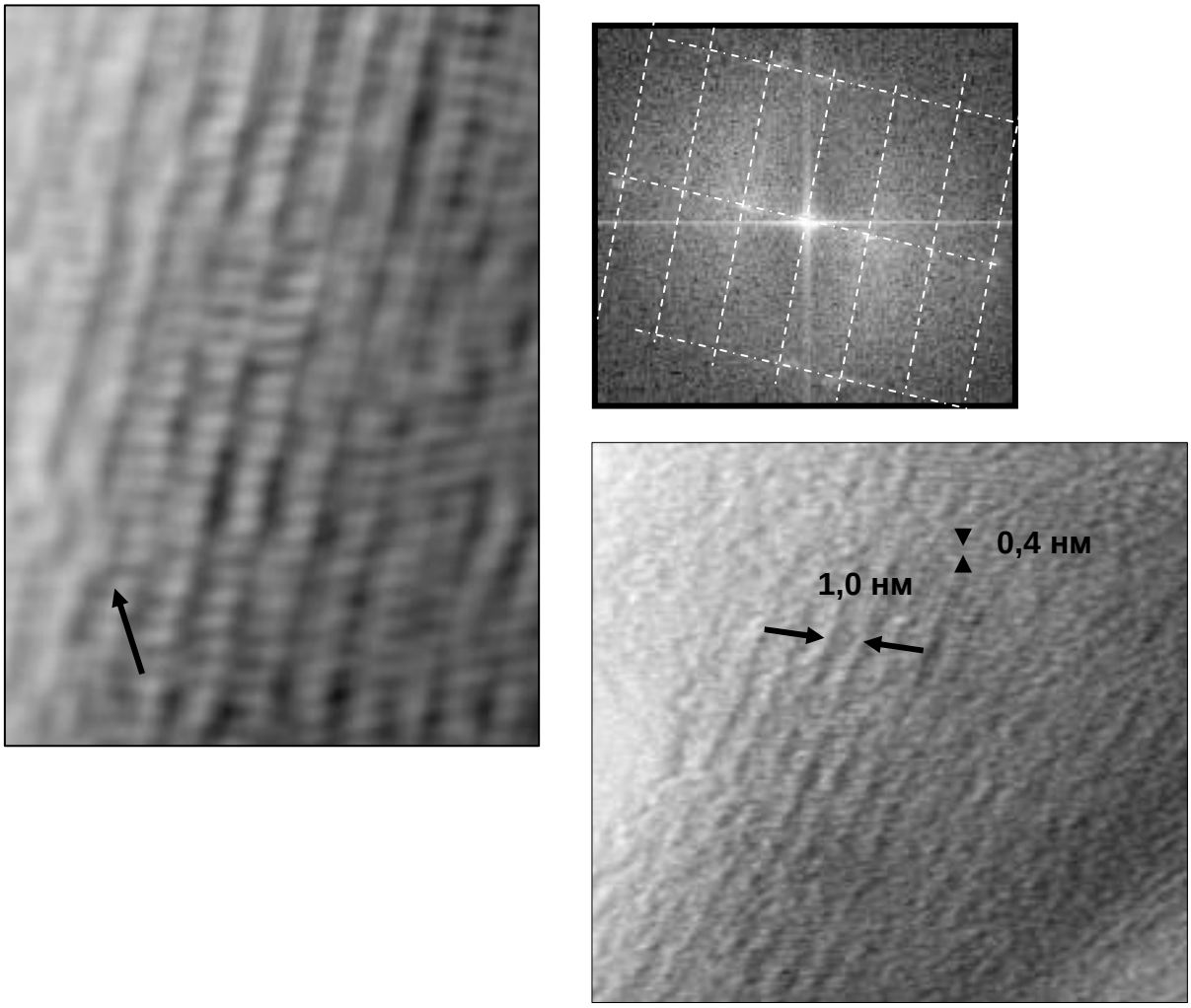



**Рис. 10. Дефекты кристаллической решетки монтмориллонита**

Таким образом, можно выделить основные факторы, влияющие на качество органобентонита:

1. Катионный состав межплоскостного расстояния в бентоните (необходима натриевая разновидность бентонита);
2. Качество глины (отсутствие дефектов кристаллической решетки монтмориллонита);
3. Емкость катионного обмена бентонита;
4. Состав поверхностно активного вещества (количество хвостов органической молекулы, их длина и химический состав);
5. Количество ПАВа.

Кроме того, большую роль в органомодификации играет количество добавленного ПАВа. В зависимости от этого органическая молекула может образовать монослой ($d_{001}$=14), бислой ($d_{001}$=17), тримолекулярный слой ($d_{001}$=21), и так называемый «парафиновый» слой ($d_{001}$>21) (рис. 11).

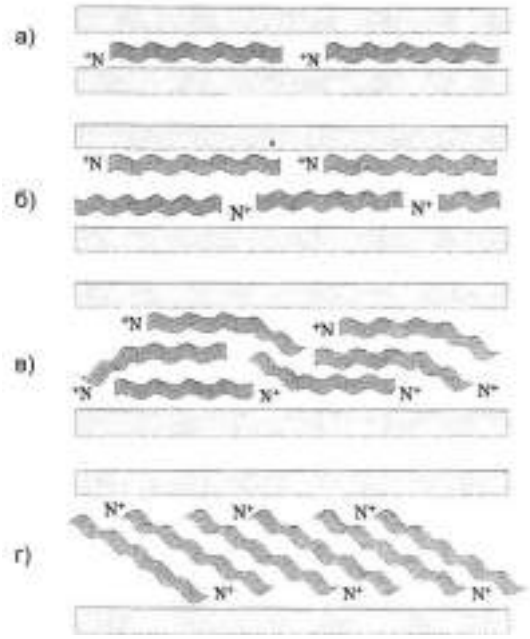



**Рис. 11. Возможное расположение органической молекулы между слоями монтмориллонита: а – монослой; б – бислой; в – трималекулярный слой; г – «парафиновый» слой**

**Способ получения органобентонита**

Существует большое количество способов органомодификации бентонита, но все они заключаются в определенной последовательности действий. А именно:

1. Натриевый бентонит сушат, приготавливают суспензию (3,5–6,5 % глины) и очищают ее от кластической части.
2. Затем приготовленная суспензия разогревается до 60–70°С и перемешивается в реакторе с ПАВом.
3. Полученная органоглина промывается и сушится в сушильном шкафу при 60–70°С.
4. Конечный продукт снова измельчается в шаровой мельнице.

Рассмотрим более детальную схему подготовки, модификации и контроля качества глины.

Комовая глина после разделения на куски размером до 2–3 см подсушивалась при 105°С в вентилируемой камере сушильного шкафа. После сушки образцы с остаточной влагой 10–12 %, подвергались истиранию в шаровой мельнице с агатовыми шарами. Далее молотый материал в виде суспензии (ГОСТ 25796.0-83—ГОСТ 25796.5.-83) пропускался через сито 0,074. Натриевая природа образца монтмориллонита, как было отмечено выше, определялась в валовой пробе до ее переработки.

Следующая стадия подготовки сырья включает седиментационный анализ. Главная задача седиментационного разделения бентонитовой суспензии заключалась в осаждении с последующим отделением кристаллической фазы. Для очистки бентонита от примеси кристаллической фазы (кристобалит, кварц, полевой шпат) использовались специальные стеклянные стаканы объемом 2,5 л. Суспензия готовилась при соотношении Т : Ж – 1:8. Седиментация производилась в дистиллированной воде. Далее после выдержки в течение 72 час суспензия медленно декантировалась в специальную емкость соответствующего размера. Желательно, чтобы не менее 80 % глинистых частиц имели размер не более 1 мкм.

Контроль на присутствие кристаллических зерен осуществлялся путем просмотра 10 препаратов под микроскопом в проходящем свете при увеличении ×70. Для этой цели на предметное стекло помещалось несколько капель суспензии и препарат просматривался под микроскопом при одном и двух скрещенных николях.

Присутствие кварца, кристобалита, карбоната или других кристаллических фаз однозначно фиксируется по особенностям их двупреломления. В случае наличия кристаллической фазы вся проба бракуется и подвергается дополнительному отмучиванию.

Как было отмечено выше, одной из причин использования глин в качестве наполнителя является переход их к наноразмерному уровню не за счет их дробления, а за счет способности глинистых частиц к самопроизвольной диспергации в сочетании с химической модификацией их поверхности. Кроме этого для обеспечения высоких физико-механических свойств нанокомпозитов типа полимер–глина необходима хорошая совместимость органического и неорганического компонентов, которые по своей физико-химической природе несовместимы. Модификация поверхности глинистых частиц посредством ПАВ позволяет решить обе названные проблемы. Применение ПАВ формирует на границе сред: полимер- силикат органофильного слоя, который увеличивает расстояние между силикатными слоями и тем самым обеспечивает проникновение полимерных комплексов в межплоскостные расстояния между силикатным слоями.

После декантации суспензия подвергается модификации органическими поверхностно активными веществами, растворами ПАВ.

Посредством многочисленных опытов было выведено оптимальное количество ПАВ, это 30 % от веса натриевого монтмориллонита, находящегося в суспензии. Поэтому первоочередной задачей на этой стадии подготовки модификации являлось определение количества твердой фазы в данной «порции» суспензии, взятой для модификации. Для этой цели использовался специальный прибор для определения содержания твердой фазы в суспензии.

При выборе ПАВ необходимо учитывать какие свойства необходимо придать органоглине. Необходимость повысить термостойкость органоглины в связи со спецификой получения нанокомпозита делает более предпочтительным ПАВ, которое разлагается при нагревании при наиболее высокой температуре (рис.12).

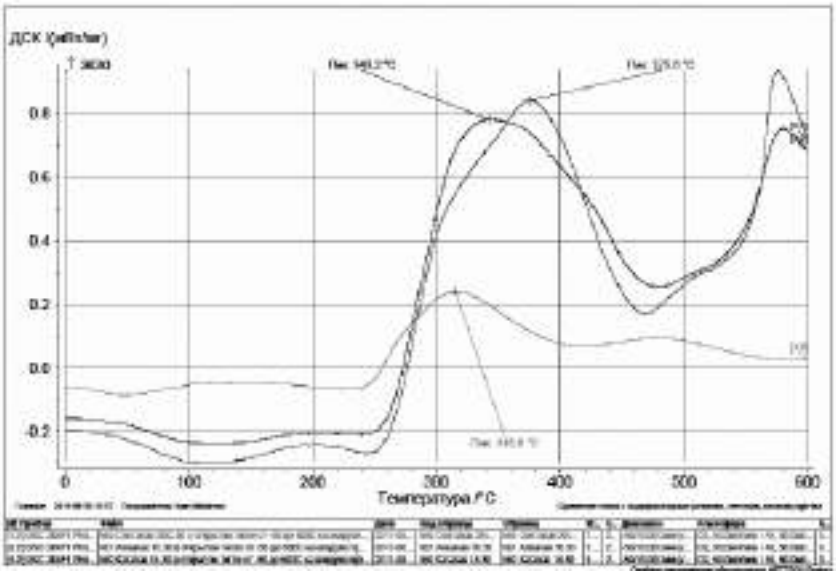



**Рис. 12. Пример выбора более термоустойчивого ПАВа, методом ДСК**

Влияние ПАВ различного состава на качество полученной органоглины показанон на ИК спектрах (рис. 13). Наличие максимумов различной интенсивности при 2920, 1700 см$^{-1}$ свидетельствует о присутствии в различных позициях групп С-Н.

Сам же процесс органомодификации заключается в постоянном перемешивании глинистой суспензии с ПАВом при определенной температуре (в нашем случае 70°С) в течение одного часа.

По истечению времени модификации, конечный продукт приобретает белый цвет с бежевым оттенком и отделяется от воды (рис. 14).

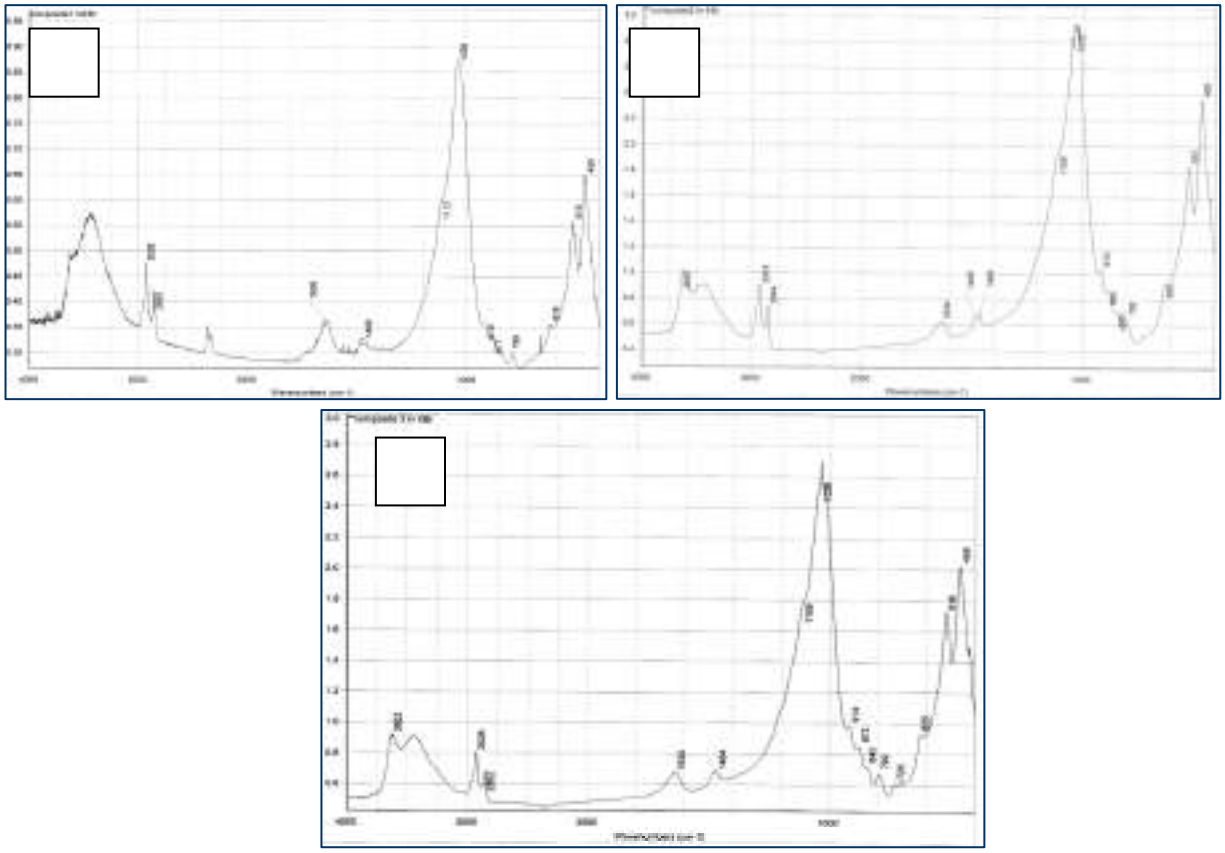


**Рис. 13. ИК-спектры Тихменевского бентонита, модифицированного поверхностно активными веществами**

**Рис. 14. Органомодифицированный бентонит**

После приготовления партии органомодифицированного бентонита происходит его сушка в сушильном или вакуумном шкафу при температуре не более 80°С, помол в шаровой мельнице и проверка качества полученного материала.

Проверка качества играет огромную роль, так как именно от качества органоглины будет зависеть свойства конечного продукта. С этой целью нами проводится целый ряд исследований, включающих в себя рентгеновский анализ, термический анализ, изучение образца под микроскопом и электронную микроскопию.

Как видно на рисунке 15, межплоскостное расстояние слоев монтмориллонита увеличилось до 25.9Å, что является хорошим признаком и указывает на то, что органическая молекула зашла в межслоевое пространство.

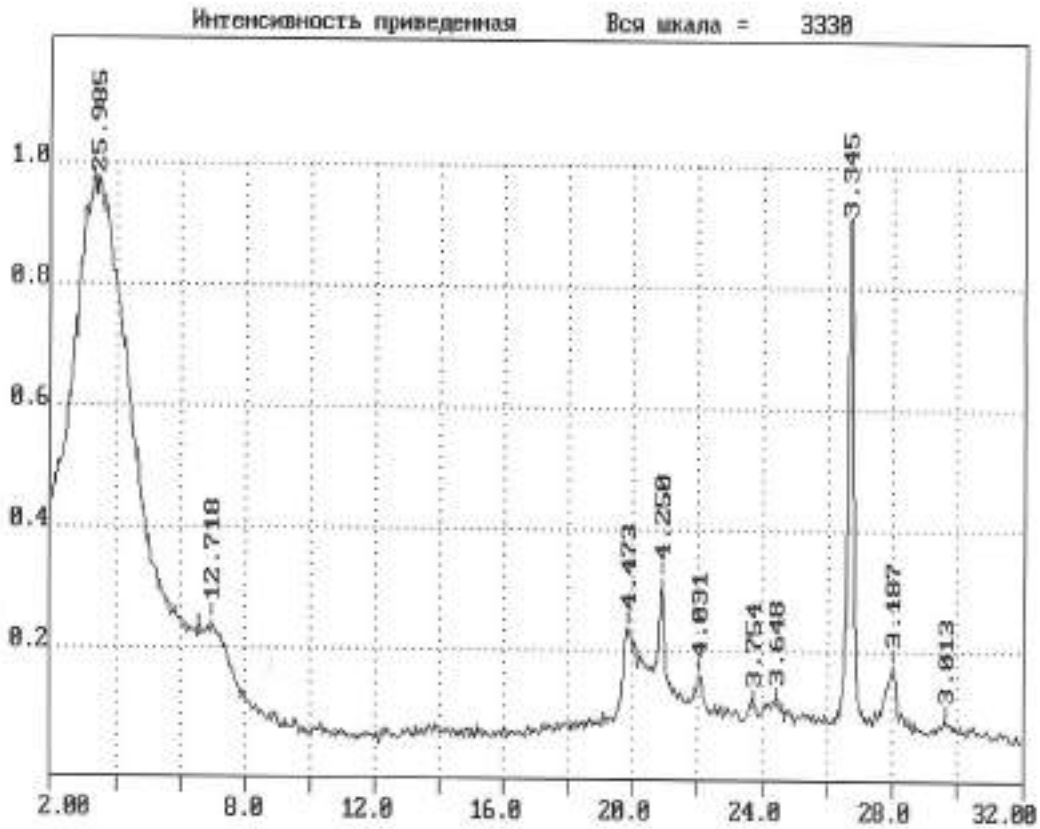



**Рис. 15. Дифрактограмма органомодифицированного монтмориллонита**

Термический анализ проводится с целью определения количественных характеристик. Интервал в 200–400°С указывают на количество поглощенного ПАВ, и на то, что ПАВ именно зашел в межслоевое пространство, а не размазался по поверхности пакетов. Так же важной характеристикой является величина потери при прокаливании (рис. 16). После сушки при 80–90°С в органоглине должно быть минимальное содержание молекулярной воды, выделяющейся при дегидратации в интервале 20–150°С, желательно не более 1,5 %.

Завершающим этапом проверки качества органоглины служит исследование образца под электронным микроскопом. По результатам данного анализза можно судить о размере частиц, нарушениях в структуре слоев органоглины, посторонних примесях (рис. 18).

О характере реакции органомодификации можно судить по электронномикроскопическим снимкам высокого разрешения (рис. 17). Более 90 % всех слоев имеет расстояние между отдельными индивидами 19 Å, что вполне соответствует норме настоящего эксперимента. Ранее мы демонстрировали образцы органоглины, в которых расстояние между слоями достигало 25 Å. Подобные оценки качества синтезированной органоглины должны сопровождать каждый эксперимент.

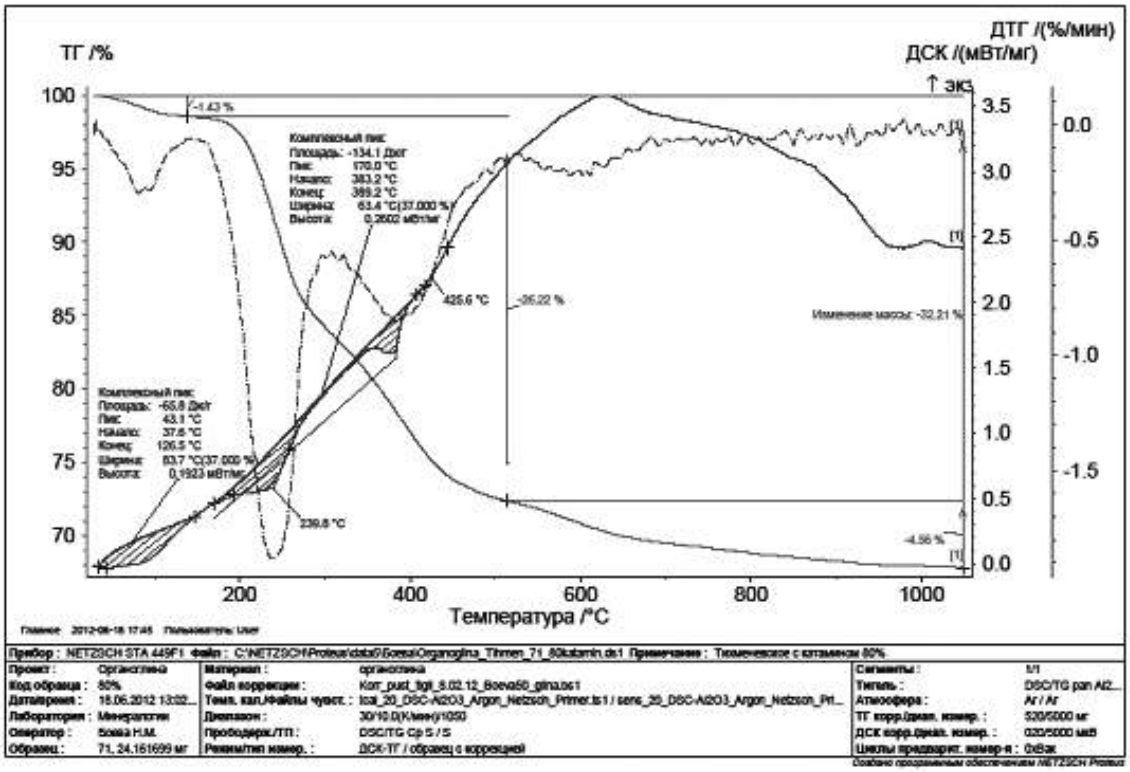



**Рис. 16. Термограммы органоглины**

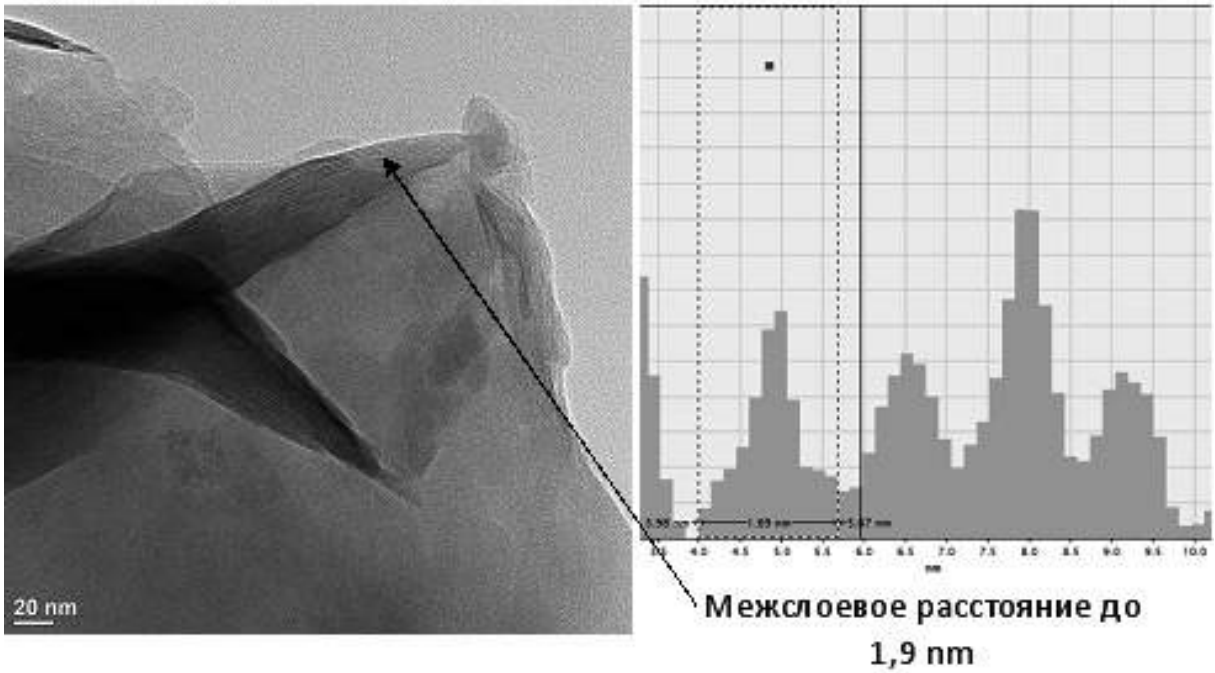



**Рис. 17. Светлопольное ПЭМ изображение частиц органоглины. Стрелкой показано увеличение межплоскостного расстояния между плоскостями до 1,9 nm**

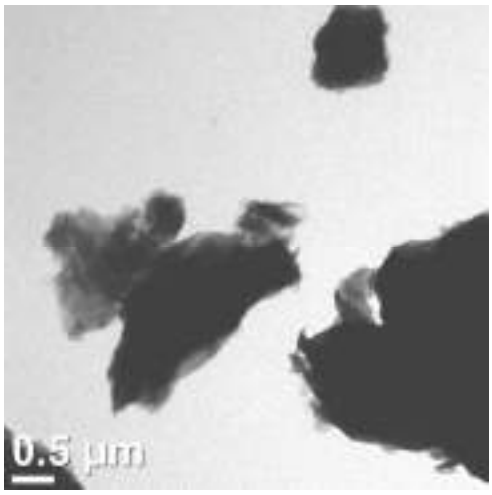



**Рис. 18. Агрегат частиц с размером отдельных индивидов 1 мкм и менее**

## Заключение

Представленные в статье материалы свидетельствуют о появлении и широком внедрении в практику строительных и различного рода других технологических работ практически новых материалов с такими показателями как повышенная термостойкость газонепроницаемость, водоотталкивающие свойства, высокая механическая прочность и т.д. В основу технологии получения таких материалов положен принцип физико-химического, минерального и кристаллохимического родства органического и неорганического вещества. Связующим компонентом между органическими и неорганическими соединениями является органоглина, свойства и механизм получения которой детально описан в данной работе. Принципиальной реакцией перехода обычного бентонита в органобентонит или бентон является замена межслоевых обменных катионов на группу $NH_4$ Характерно, что наиболее эффективно эта реакция протекает по схеме $NH_4$ →→Na. Поэтому технологи при синтезировании органоглины предпочитают использовать натриевый бентонит. Крайне желательно, чтобы содержание натриевого монтмориллонита в бентоните было максимальным, порядка 80–90 %.

Крайне не желательны такие минералы-примеси как кварц или другие минеральные формы кремнезема.

Слои монтмориллонита должны быть гибкими и эластичными. В слоистом силикате желательно отсутствие признаков хрупкой деформации кристаллических слоев и их изгибов. В то же время остается много неясных вопросов. В частности как влияет на синтез органоглины присутствие природного органического вещества и в частности органических кислот, содержащих группы СН.

Методом инфракрасной спектроскопии установлено, что органические кислоты, образующиеся при разложении растений, могут входить в межслоевое пространство монтмориллонита и влиять при этом на гидрофильные свойства минерала. Важное значение имеют и другие вопросы генезиса монтмориллонитовой глины, и в частности источник природного синтеза этого минерала. В бентонитах о-ва Сахалин впервые было установлено, что бентониты образовались путем замещения вулканического стекла монтмориллонитом с образованием гидрогелей.

Одним из главных направлений исследований готовой органы глины является определение ее качества, и в том числе определение основных факторов влияющих на кристаллизацию органических кристаллов в процессе полимеризации органической массы при получении готового продукта.

Большинство исследований указанных в данной статье проводились с бентонитом Тихменевского месторождения, острова Сахалин.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Демиденок К.В., Ладыгина Г.В., Лыгач В.Н., Наседкин В.В. Вещественный состав и технические свойства бентонитоподобных глин Центрального региона России и оценка возможности повышения их качества для использования в наиболее важных отраслях современного производства. Актуальные инновационные исследования: наука и практика, 2012.
2. Наседкин В.В., Боева Н.М. Изучение вещественного состава бентонитов Аккалканского месторождения, оценка промышленного значения месторождения. Москва, 2008.
3. Наседкин В. В., Квапта Ф.С., Стаханов В.В. Бентониты в производстве России. М.: ГЕОС, 2001.
4. Справочное пособие (под редакцией В.П.Петрова) Неметаллические полезные ископаемые, М, Недра, 1984.
5. Andre Maes, M. S. Stul, and Andrien Cremers. Layer charge-cation-exchange capacity relationships in montmorillonite. Clays and Clay Minerals, Vol. 27, No. 5, 1979.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

# ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ РЕГИОНАЛЬНОГО И КОНТАКТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАРГАНЦЕВЫХ РУД

***Мартынова Т.А.***

ФГУП «ВИМС», г. Москва, rocail@mail.ru.

Качественные характеристики руд марганцевых объектов геосинклинального типа по ряду причин, связанных с особенностями химизма и строения, невысоки. Смешанные карбонатно-силикатные марганцевые руды вулканогенно-осадочных проявлений, подвергшиеся в процессе формирования метаморфизму различных степеней, нередко полиметаморфизму, характеризуются сложным строением и, как правило, невысоким содержанием марганца, повышенными содержаниями железа и кремния, что в совокупности относит их к категории труднообогатимых.

Постоянно снижающееся качество руд, а эта проблема затрагивает большинство промышленно важных видов сырья, включая руды чёрных металлов, вынуждает вовлекать в промышленную переработку руды с неблагоприятными для обогащения технологическими свойствами. К этой категории относятся руды с относительно низким содержанием полезного компонента, наряду с чем присутствие вредных примесей часто характеризует их как фосфористые, железистые и/или высококремнистые; руды с всё более усложняющимся минеральным составом, что для марганцевых руд в первую очередь обусловлено их полиминеральностью при низкой контрастности физико-химических свойств сосуществующих минералов, гетерогенностью текстурно-структурных признаков при общем уменьшении размеров минеральных зёрен в рудах (влиянием размерного фактора) и многим другим, что отражено в работах ведущих специалистов в области технологической минералогии и на что, в частности, указывает в своей статье Б.И. Пирогов [1].

На примере труднообогатимых руд смешанного состава (карбонатно-силикатных и существенно силикатных) из двух вулканогенно-осадочных марганцевых проявлений, входящих в метаморфические комплексы разных металлогенических зон, мы попытались выяснить как тип метаморфизма и интенсивность метаморфических преобразований могут повлиять на качество марганцевой руды.

Рассматриваемые объекты – Утхумское рудопроявление в Восточных Саянах и Ир-Нимийское на Дальнем Востоке – расположены в окраинной субширотной части Урало-Монгольского складчатого пояса и занимают похожее положение – в зоне перехода субплатформенных областей к складчатым структурам. В строении рудопроявлений участвуют регионально-метаморфизованные породы известково-кремнистого состава: на Утхумском проявлении – это терригенно-кремнистые породы верхнего протерозоя, на Ир-Нимийском –эффузивно-кремнистые верхнекембрийские отложения. Пласты марганцевых руд Утхумского проявления залегают среди слюдистых, гранат-эпидот-амфиболовых сланцев, степень метаморфизма которых постепенно понижается от фации альмандиновых амфиболитов до средне-низкотемпературной ступени фации зелёных сланцев (Окороков В.Г., Серебренников В.И., 1967-69 гг.).

Основное марганцевое оруденение на Ир-Нимийском проявлении локализуется среди пестроокрашенных яшм, кремнистых и глинисто-кремнистых сланцев, залегающих вблизи известняков и микрокварцитов. Степень метаморфизма ир-нимийских руд и вмещающих пород по данным Роганова Г.В. (1977), соответствует низкотемпературной фации зелёных сланцев.

Фации контактово-метаморфизованных пород широко представлены на Утхумском рудопроявлении. Контактовые изменения руд обусловлены близостью гранитных батолитов, габбро и даек диабазов, возможно не вскрытых эрозией интрузивных тел. На Ир-Нимийском рудопроявлении развиты в основном регионально-метаморфизованные породы. Судя по присутствию в рудном комплексе участка Джаводи (Ир-Ними) небольшого количества контактово-метаморфизованных разновидностей руд, можно предположить, что термальные преобразования регионально-метаморфизованных отложений носили не выраженный, вероятно селективный характер, и связаны с ослабленными тектоническими зонами, по которым внедрялись дайки основного состава.

Известно, что интрузии основного состава образуют меньший ореол метаморфизма, чем кислые интрузии, обладая, по-видимому, небольшой энергией при внедрении, они также в меньшем количестве содержат летучие компоненты.

В соответствии с вышесказанным, степень преобразования руд под воздействием факторов регионального и контактового метаморфизма на рудопроявлениях различна.

На конечной стадии руды подверглись метасоматозу, проявившемуся в виде окварцевания, карбонатизации и сульфидизации, а также щелочному метасоматозу.

Геологические факторы, под влиянием которых формировались марганцевые объекты, обусловили ряд типоморфных особенностей, влияющих на качество и обогатимость руд.

Согласно визуальным наблюдениям образцов руд метаморфогенного генезиса и изучению их в шлифах под микроскопом, метаморфические процессы регионального и локального характера по-разному отразились на минеральном составе и текстурно-структурных признаках руд.

Контактово-метаморфизованные разновидности обоих проявлений обладают в основном пятнистой текстурой, для утхумских руд характерна также полосчатая и тонко-полосчатая текстуры. По гранулярному составу руды распространены структуры мелко- и среднекристаллические, по морфологии выделений – грано- и гетеробластовые, пойкилобластовые.

Структуры утхумских руд часто достигают уровня среднекристаллических, однако при этом в них развиты структуры мозаичного бластеза (вторичной перекристаллизации) и пойкилобластеза, в результате чего фактический размер рудных зёрен в целом соответствует мелкокристаллической руде.

Структуры ир-нимийских руд в основном мелко- и скрытокристаллические, гетеробластовые, ввиду широкого развития на проявлении регионально-метаморфизованных разновидностей псиломелан-родохрозит-родонитового состава. Контактово-метаморфизованные разновидности присутствуют в подчинённом количестве. Но для них, также как для утхумских руд, характерны мелко- и среднекристаллические, различные бластические структуры, за исключением пойкилобластовых. Важной структурной особенностью ир-нимийских руд является присутствие в них реакционных изменений в виде новообразованного пироксмангита по периферии крупных агрегатов родонита, от которых не подвергшимися процессам перекристаллизации нередко остаются только центральные части (рис. 1).

Марганцевые породы и руды в значительной степени чувствительны к контактовому метаморфизму: скрыто- и мелкозернистые исходные породы преобразуются в более крупнозернистые разновидности. Например, в рудах Утхумского проявления, где значение контактового метаморфизма является определяющим, мелко-среднекристаллические структуры преобладают. И также на Ир-Нимийском проявлении мелко-среднекристаллические структуры характерны только для карбонатно-силикатных и силикатных руд, в которых развиты ассоциации контактовых минералов.

Таким образом, скрыто-, мелко- и среднекристаллические разновидности присутствуют на рудопроявлениях в разных количественных соотношениях. Факторы низкотемпературного регионального метаморфизма обуславливают формирование карбонатно-силикатных разновидностей руд, характеризующихся главным образом скрытокристаллическим (реже мелкокристаллическим) строением и массивными текстурами. Впоследствии, под влиянием гипергенных процессов в рудах получили развитие коррозионные структуры и прожилково-вкрапленные текстуры. Факторы контактового и регионального метаморфизма средних ступеней обуславливают изменение и усложнение минерального состава руд, увеличение зернистости минеральных фаз и развитие пятнистых и полосчатых текстур (табл. 1).

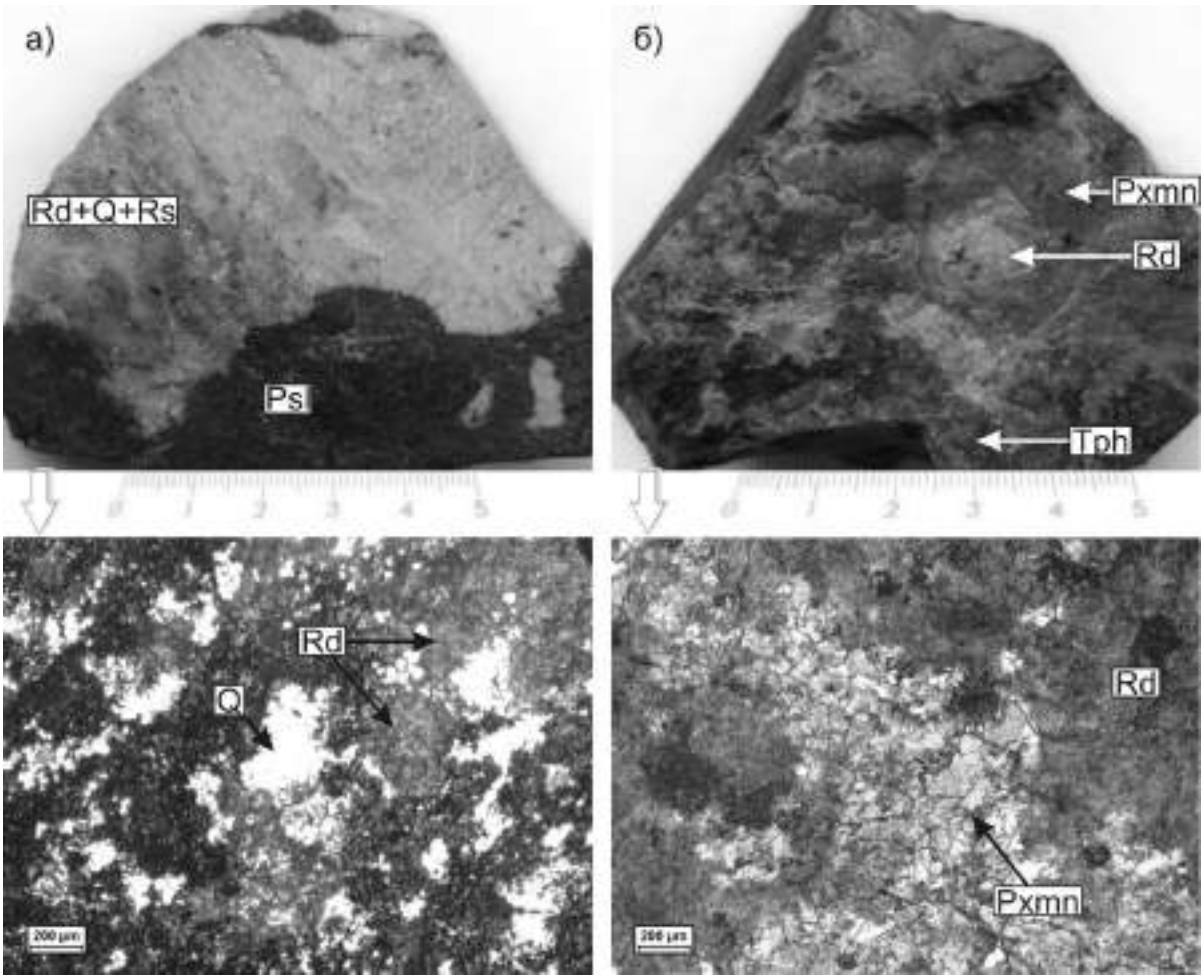



**Рис. 1. Морфология рудных минералов, представленная в образцах и шлифах а) регионально- и б) контактово-метаморфизованных руд Ир-Нимийского проявления (уч. Джаводи), где Rd – родонит, Q – кварц, Rs – родохрозит, Psl – псиломелан, Pxmn – пироксмангит, Tph – тефроит**

Различия между рассматриваемыми вулканогенно-осадочными марганцевыми проявлениями, входящими в метаморфические комплексы разных металлогенических зон отмечаются, прежде всего, в минеральных ассоциациях руд и в составе вмещающих пород. Главные минералы карбонатно-силикатных марганцевых руд (родохрозит, родонит, тефроит) являются типичными для минеральных ассоциаций большинства подобных марганцевых проявлений, поэтому присутствие их в рудах не может быть сравнительным признаком. В этом отношении более важен изоморфизм компонентов структуры минералов, фиксируемый в составе минеральных серий, который в зависимости от интенсивности проявления метаморфизма, в одном случае представлен широким рядом минеральных видов, как на Утхумском рудопроявлении, в другом — достаточно ограниченно, не более чем двумя-тремя минералами в каждой серии твердых растворов, что мы наблюдаем на Ир-Нимийском проявлении. С более поздними этапами контактового метаморфизма, гидротермальной деятельности и метасоматическими изменениями на объектах связано также и появление акцессорных минералов в рудовмещающем комплексе и общей вторичной (наложенной) минерализации (табл. 2).

Таблица 1. Минеральные разновидности руд и их морфоструктурный состав в зависимости от ведущего типа метаморфизма

| Тип метаморфизма | Фации метаморфизма | Минеральные разновидности руды | **Текстура** | **Структура** | **Минеральные ассоциации**** | **Акцесс. м-лы** | Руд-ние |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Региональный (+метаморфизм погружения*) | Зелёных сланцев (+ голубых сланцев) | **Псиломелан-родохрозит-родонитовые руды** | –пятнистая; –прожилково-вкрапленная | – скрытокристаллическая; – гетеробластовая; – грануляционная; – коррозионная | Psl-**Rs**-Q-**Rd** | Cym, Als, Ba; Ln, Jp | И.-Н. |
| Региональный | Эпидот-амфиболитовая | **Манганокальцит-родонитовые руды** | – массивная | – скрытокристаллическая; – гетеробластовая – коррозионная | Psl-Q-Grt-**MnCal**-(Rs)-**Rd** | Py | Утх. |
| Контактовый* | Альбит-эпидотовых роговиков | **Тефроит-родонитовые руды** | – пятнистая | –от мелко- до среднекристаллической; – гранобластовая | Grt-Bmt-**Rs**-**Tph**-**Rd**-Pxmn-Bst | Abn Ln, Jp Py, Po | И.-Н. |
| Контактовый | Амфиболовых (до пироксено-вых) роговиков | **Спессартин-пикротефроит-родонитовые руды** | – пятнистая; – полосчатая; – такситовая | – от мелко- до среднекристаллической; – гранобластовая; – гипидиобластовая; – пойкилобластовая | **Ktn**-**MnCal**-(Rs)-**Grt**-**PTph**-**MnKnb**-**Rd**-**Pxmn**-**Bst** | Abn Pd Mo, Gn; Prsm; Py, Po | Утх. |

* — влияние на генезис руд ранее не рассматривалось

** — Сокращения названий минералов:

Rs – родохрозит
Mn-Cal – манганокальцит
Ktn – кутнагорит
Psl – псиломелан

Rd – родонит
Pxmn – пироксмангит
Bst – бустамит

Tph – тефроит
PTph – пикротефроит
Mn-Knb – манганкнебелит

Prph – пирофанит
Prsm – пиросмалит
Bmt – бементит
Cym – кимрит
Als, Ba – альстонит, барит

Abn – алабандин
Ln, Jp – линнеит, джайпурит
Py, Po – пирит, пирротин
Pd – полидимит
Mo, Gn – молибденит, галенит

Таблица 2. Сравнительна минералогическая характеристика

| Рудопроявление | **Утхумское** | **Ир-Нимийское** |
|---|---|---|
| **Рудные минералы:** | | |
| карбонаты | *Изоморфные серии в группе кальцита и доломита* (Ca, Mn, Mg, Fe)$CO_3$ – Ca(Mn, Mg, Fe)$CO_3$ | |
| | Манганокальцит – Родохрозит – Олигонит<br>Манганодоломит – Кутнагорит – Анкерит | Манганокальцит – Родохрозит<br>Манганодоломит |
| силикаты | *Изоморфные серии в оливинах* (Mn, Mg, Fe)$_2$ $SiO_4$ | |
| | Тефроит – Пикротефроит – Кнебелит | Тефроит – Кнебелит |
| | *Полисоматические серии пироксеноидов* Ca, $Mn_4[Si_5O_{15}]$ – (Mn, Ca)(Mn, Fe, Mg) $_6[Si_7O_{21}]$ – $Ca_3Mn_3[Si_3O_9]_2$ | |
| | Родонит<br>Пироксмангит<br>Бустамит | Родонит<br>Пироксмангит<br>Бустамит |
| | *Алюмосиликаты: группа граната* (Mn, Fe, Mg, Ca)$_3$(Fe, Al)$_2[SiO_4]_3$ | |
| | Спессартин – Fe-Ca-спессартин | Спессартин |
| | *Силикаты с гидроксильной группой* | |
| | Пиросмалит (Mn, Fe)$_8$(OH, Cl)$_{10}[Si_6O_{15}]$ | Бементит $Mn_8[(OH)_{10}[Si_6O_{15}]$ |
| сложные окислы | *Группа ильменита* | |
| | Пирофанит (Mn, Fe)$TiO_3$ | |
| | *Оксиды и гидроксиды марганца* | |
| | Псиломелан, вернадит, тодорокит | Псиломелан, вернадит, нсутит, тодорокит, рансьеит, браунит, пиролюзит, рамсделлит |
| **Нерудные минералы:** | Слюды: биотит, мусковит<br>Пироксен: Mn-содерж. диопсид<br>Амфиболы: роговая обманка, манганкуммингтонит<br>Хлорит | Слюды: биотит, мусковит<br>Пироксен: Mn-содерж. диопсид<br>Амфиболы: роговая обманка, манганрихтерит<br>Хлорит |
| **Акцессорные минералы:** | *Сульфидная минерализация* | |
| | Алабандин, галенит, молибденит<br>Полидимит (гр. линнеита)<br>Пирит, пирротин, гетит | Алабандин<br>Линнеит, джайпурит (гр. линнеита)<br>Пирит, пирротин, гетит |
| | *Прочие минералы* | |
| | Куприт, самородная медь, сфен, апатит | Самородная медь, азурит, малахит,<br>кимрит, барит, альстонит |

Важно отметить присутствие индекс-минералов, являющихся продуктами метаморфизма и характеризующими определённый его тип. На Ир-Нимийском проявлении развитие в рудовмещающем комплексе амфиболов — глаукофана и манганрихтерита и собственно в рудах алюмосиликата бария — кимрита, свидетельствует о региональном метаморфизме в условиях низких температур и высокого давления. Присутсвие пьемонтита, браунита в ассоциации с барийсодержащими минералами может являться одним из характерных (типоморфных) признаков для определённых условий образования. Подобная ассоциация минералов, впервые описанная Т. Ватанабе [2] в регионально-метаморфизованных рудах японского рудника Сиромару в префектуре Токио, по мнению японского учёного, представляет геохимический интерес. Вместе с тем, присутствие среди карбонатно-силикатных разновидностей ир-нимийских руд контактовых минералов, а также особенности сульфидной минерализации, свидетельствуют о наложенных (термальных) метаморфических преобразованиях, что приближает состав ир-нимийских руд к составу (умеренно) контактово-метаморфизованных руд проявлений Японии и Швеции (Лонгбан).

Утхумские руды в сравнении с ир-нимийскими, как уже было сказано, являются наиболее контактово-метаморфизованными, причем в зонах наибольшего термального изменения (вблизи гранитных массивов), рудные ассоциации минералов характеризуют рудные образования как продукты пирометасоматического и гидротермального происхождения. Об этом, наряду с развитыми минеральными сериями (состав руд весьма пёстрый), свидетельствует вхождение в рудные ассоциации таких минералов как пирофанит и пиросмалит.

Следует подчеркнуть, что в рудных ассоциациях присутствуют минералы как регионального, так и контактового метаморфизма, и минералогические признаки дают возможность определить подтипы оруденения, в частности наличие контактово-метаморфизованных образований, идентифицируя типичные контактовые минералы и выявляя специфические реакционные изменения в руде.

Смешанные (карбонатно-силикатные) марганцевые руды, а особенно их контактово-метаморфизованные разновидности, имеют сложное строение, поэтому, разделение минералов разных групп, например, рудных силикатов и рудных карбонатов при сепарации практически невозможно. При дроблении и измельчении руды происходит образование как полиминеральных агрегатов с переменным содержанием карбонатов и силикатов марганца, так и мономинеральных агрегатов, в состав которых входят минералы, нередко представленные изоморфными смесями. Поэтому обогащают в целом рудную фазу — агрегаты, состоящие из нескольких рудных минералов.

По минеральному составу и текстурно-структурным особенностям карбонатно-силикатные руды марганцевых проявлений близки. По химическому составу они являются высококремнистыми. Утхумские руды фосфористые и железистые; в ир-нимийских рудах содержания как фосфора, так и железа незначительны, что является благоприятным фактором для их обогащения физическими методами.

Труднообогатимые марганцевые руды, генезис которых во многом определялся повышенными степенями регионального и контактового метаморфизма, например амфиболитовой фацией, как на Утхумском проявлении, в силу особенностей минерального состава и строения, близости физических свойств (плотности, микротвердости, удельной магнитной восприимчивости) практически исключают возможность их обогащения традиционными физическими методами. Применение методов химического обогащения для вскрытия рудных минералов и последующей переработки продуктов разложения, позволяет полностью вскрыть карбонатные, и лишь частично силикатные марганцевые и породообразующие минералы.

Утхумскую руду, состоящую в основном из контактово-метаморфизованных разновидностей, обогащать физическими методами нецелесообразно. Поэтому на основании результатов, полученных при изучении технологических свойств исходных руд и их технологических испытаний, рекомендовалось использование отдельных операций радиометрического и механического обогащения для подготовки руд к химико-металлургическому переделу.

На Ир-Нимийском проявлении преобладают регионально-метаморфизованные руды псиломелан-родохрозит-родонитового состава. В технологической пробе, отобранной в 2010-м году

на участке Джаводи, они составляли значительную часть. Технологические испытания этих руд дали положительный результат, что в принципе делает их перспективными для промышленной переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов Б.И. Поведение минералов в единой геолого-техногенной системе // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах. Сборник статей по материалам VI Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2012. С. 14–29.
2. Ватанабе, Т. Юи С., Като А.. Обзор пластовых марганцевых месторождений //Сб. «Вулканизм и рудообразование». М: «Мир», 1973. С. 104–121.

## МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

***Жукова В.Е.[1], Целюк Д.И.[2]***

[1] ФГУП ВИМС, г. Москва, vera_fram@mail.ru
[2] ГПКК КНИИГиМС, г. Красноярск, cdi@kniigims.ru

По запасам железных руд Россия занимает первое место в мире, располагая почти третью мировых запасов. Однако руды характеризуются невысоким качеством. Поэтому по-прежнему актуальным остается вопрос освоения новых железорудных объектов, в том числе и техногенного происхождения. В комплекс задач, направленных на расширение минерально-сырьевой базы железа, входит минералого-технологическая оценка техногенного железорудного сырья, которое в ближайшей перспективе может быть вовлечено во вторичное освоение. Переработка техногенного сырья, в том числе лежалых хвостов горнорудного производства, содержащих железо, сегодня экономически целесообразна, так как не требуются затраты на его добычу и транспортировку к месту переработки и позволяет сократить количество отходов, что в свою очередь существенно снижает негативное влияние на окружающую среду.

Объектом исследования являются техногенные отложения хвостохранилища железорудной фабрики ОАО «Краснокаменское рудоуправление», расположенные в окрестностях пгт. Краснокаменска. Лежалые хвосты сформированы отходами переработки руд месторождений Маргоз, Одиночное, Рудный каскад. Минералогическое изучение проведено комплексом минералого-аналитических методов (оптическая и электронная микроскопия, рентгенографический, рентгенотомографический и химический анализы).

Изученные пробы лежалых хвостов в целом имеют полиминеральный состав, отражающий состав перерабатываемых руд, их можно отнести к гематит-магнетит-гетитовому и гематит-гетит-магнетитовому минеральным типам.

Главными рудными минералами являются магнетит, гематит, гетит. В резко подчиненном количестве присутствуют пирит, халькопирит и халькозин (рис. 2 в, г). При этом, необходимо отметить, что количество рудных минералов и агрегатов значительно меньше, чем количество породообразующего материала, что, естественно, обусловлено объективными причинами и типично для техногенных отходов данной категории (рис. 1). Фракционирование исходных проб (материал крупностью –0,5+0,25) по плотности в бромоформе (ρ – 2.93 г/см$^3$) показало следующую картину: в легких фракциях наряду с кварцем, слоистыми алюмосиликатами (хлорит, мусковит, реликты глинистых минералов) всегда присутствует гетит, в тяжелых фракциях концентрируются магнетит, как не измененный, так и в различной степени гематитизированный, гематит, гетит. Из нерудных минералов отмечаются гранат, эпидот, пироксен.

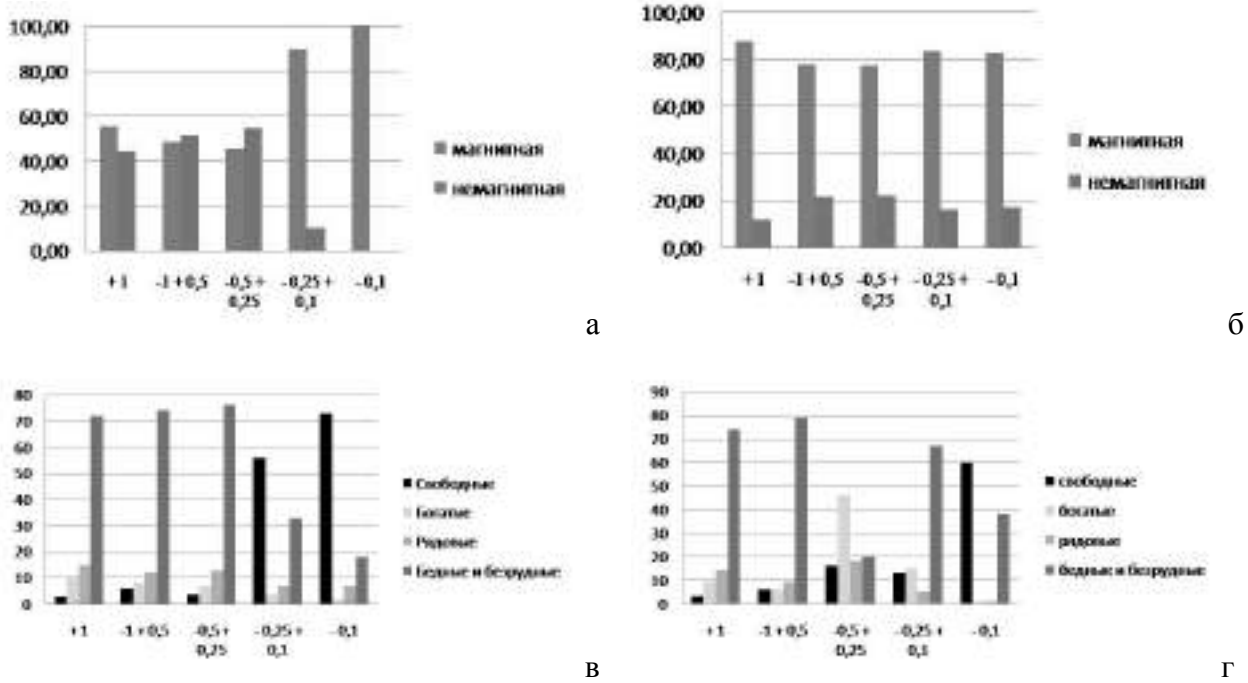



**Рис. 1. Соотношение магнитной и немагнитной фракции в пробе техногенных отложений: а – из пляжной зоны хвостохранилища; б – прудовой зоны хвостохранилища. Распределение типов сростков по классам ситового анализа в пробе техногенных отложений: в – из пляжной зоны хвостохранилища; г – из прудовой зоны хвостохранилища**

Содержание магнетита составляет 10–13%. Большей частью зерна минерала сохраняют кристаллографическую огранку (октаэдры, реже ромбододекаэдры), но встречаются также фрагменты кристаллов и окатанные зерна. Магнетит неравномерно гематитизирован (рис. 2 а, б). Гематит развивается по магнетиту в виде пятен различных форм и размеров, каемок. Нередко магнетит полностью замещен гематитом и гетитом с сохранением формы зерен. Удельная магнитная восприимчивость не измененного магнетита равна: 33400*$10^{-8}$ $м^3$/кг. Гематитизированный магнетит обладает более низкой удельной магнитной восприимчивостью (25700 *$10^{-8}$ $м^3$/кг). Магнетит, в целом, имеет близкую плотность, равную 5,06–5,09 г/см $^3$. Однако, отмечается магнетит, имеющий меньшую плотность (4,77г/$см^3$), что обусловлено, как присутствием в нем включений более легких породообразующих минералов, так и интенсивностью вторичных изменений.

Электронно-микроскопическими исследованиями установлены четкие срастания октаэдрических кристаллов магнетита, поверхность которых обычно отличается высокой микропористостью и микротрещиноватостью. Форма и размер пор и трещин разнообразные. Иногда можно проследить систему паутинообразных трещин, преимущественно разно ориентированных, мощность которых менее 1 мкм. Нередко в полостях отмечается повышенное содержание кремния и алюминия, что связано с присутствием в них слоистых алюмосиликатов. В целом, наблюдаются и более сложные вторичные структуры, связанные с образованием колломорфноподобных, скрыто-мелкокристаллических агрегатов. Как правило, агрегаты имеют полиминеральный состав, в них, помимо магнетита и гематита, отмечаются тонкодисперсные гидроксиды железа, слоистые алюмосиликаты, эпидот, иногда кварц. Микрорентгеноспектральным анализом установлено, что они отличаются более высокими содержаниями марганца, титана, кремния, алюминия, фосфора. Это однозначно указывает на их полиминеральный состав Структурное преобразование поверхности зерен магнетита явно связано с гипергенными процессами. Грани одного зерна магнетита могут быть изменены в различной степени, что также фиксируется электронно-микроскопическими исследованиями. Микронеоднородность магнетита связана не только с неравномерной мартитизацией, но и с широко развитыми в магнетите структурами распада.

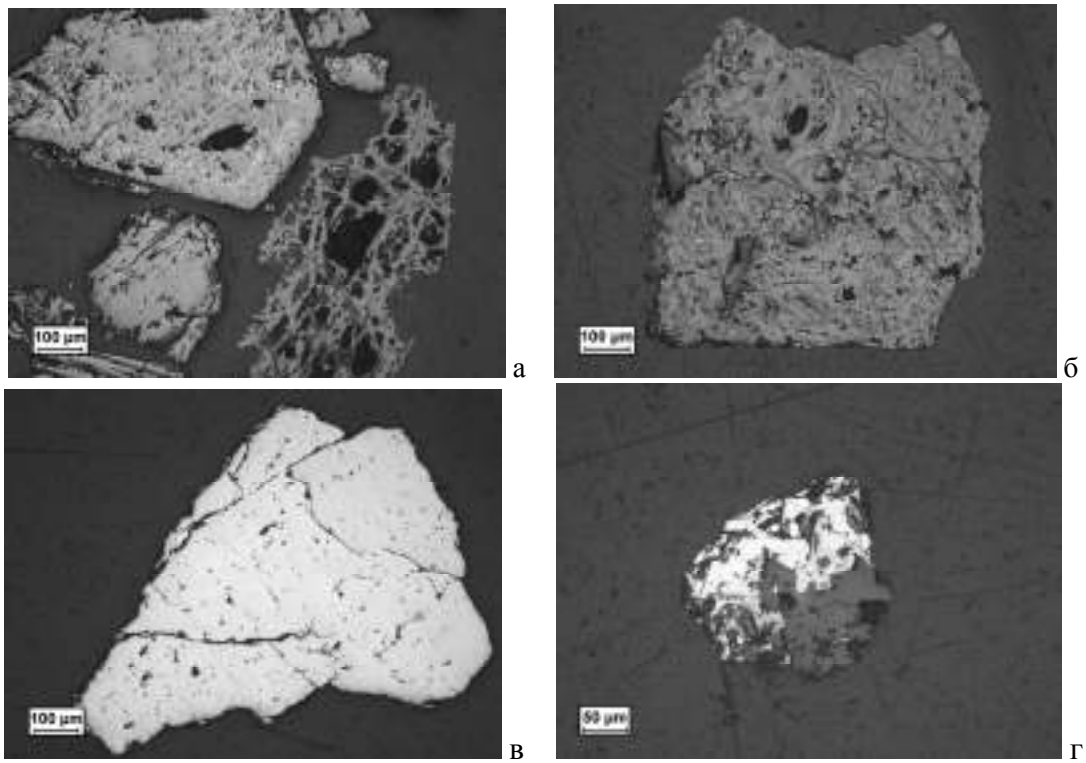



**Рис. 2. а – различные стадии изменения зерен магнетита; б – фрагмент зерна магнетита, полностью замещенного гетитом; в – фрагмент зерна пирита; г – фрагмент измененного зерна халькопирита (светлое – халькопирит, темно-серое – халькозин)**

Структуры распада свойственны магнетиту, обогащенному титаном. В магнетите четко прослеживаются сетчатые и решетчатые структуры распада, нередко ориентированые субпараллельно плоскостям микроблоков. Вдоль направлений октаэдрической отдельности магнетита формируется гематит, а также тонкодисперсный агрегат, сформированный, вероятнее всего, диоксидами титана (рутил, анатаз) и слоистыми алюмосиликатами, в которых отмечаются повышенные содержания V, Cr. Наблюдаются также хорошо сохранившиеся несколько измененные, субпараллельные микроблоки, характеризующиеся слабо повышенными концентрациями Mn, Ti, что подтверждено данными микрорентгеноспектрального анализа.

Определение реального состава магнетита проведено методом Мессбауэровской спектроскопии (ЯГРС), которым также идентифицированы минералы железа в магнитной фракции. Магнетит обеих проб нестехиометричный, в его структуре присутствуют изоморфные примеси, представленные, по нашему мнению, титаном и, возможно, алюминием, также отмечаются не структурные (механические) примеси в виде включений породообразующих фаз.

На основе исследований гранулярного состава, характера раскрытия сростков рудных минералов и их распределения по классам крупности, а также анализа поведения рудных минералов в процессах дезинтеграции лежалых хвостов с последующей магнитной сепарацией установлено, что в качестве основных методов обогащения можно рекомендовать гравитационный и магнитный. Процент извлечения может быть повышен за счет дробления исходных хвостов до крупности 0,25 мм с предварительной отмывкой или отмучиванием.

Лежалые хвосты, отобранные из пляжной зоны и пруда отстойника, при некотором отличии в гранулярном, химическом и минеральном составах в целом являются близко одинаковыми.

Главными породообразующими минералами являются кварц и слоистые алюмосиликаты, которые присутствуют в тонкой смеси, что не позволяет провести их количественную оценку. Второстепенными минералами являются магнетит, гематит, гетит, полевой шпат и гранат. Акцессорными – пирит, халькопирит, пироксен, амфибол, эпидот, рутил, кальцит, халькозин, апатит.

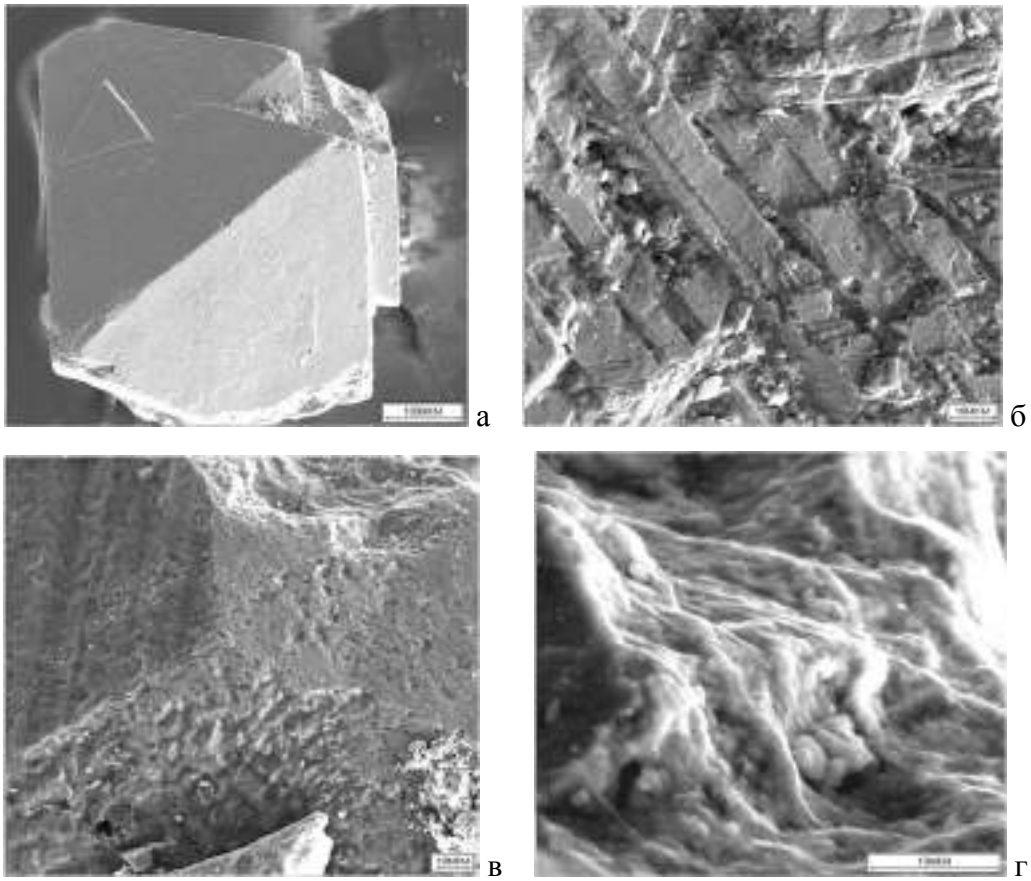



**Рис. 3 а – сросток октаэдрических кристаллов магнетита; б – структура распада в магнетите; в – разная степень травления граней кристалла магнетита; г –колломорфноподобная структура поверхности скола на вершине октаэдра магнетита**

Магнетит представлен как свободными зернами преимущественно идиоморфной и панидиоморфной формы, так и агрегатами зерен. Процессы окисления приводят к структурному преобразованию поверхности зерен магнетита (наличие микроблоков, микропор и микротрещин). Для магнетита типичны структуры распада.

Выявленные минералогические особенности руд в целом и магнетита в частности определяют технологические свойства сырья. Так, гематитизация, микроблочность, микротрещиноватость и микропористость магнетита, наличие структур распада, а также присутствие изоморфных примесей в минерале приводит к снижению плотностных и магнитных свойств. Микроблоковое строение магнетита может способствовать повышению коэрцитивной силы и флокуляции мелких зерен минерала.

Авторы признательны своим коллегами, проводившим минералого-аналитические исследования, к.г.-м.н. В.В.Ружицкому, д.г.-м.н. О.А.Якушиной и д.г.-м.н. В.В.Коровушкину.

# ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ КВАРЦЕВЫХ ПОРФИРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РОЗА-ЛАМПИ КАК ИСТОЧНИКА ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ

***Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.***

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

В последнее время увеличивается мировой уровень производства и потребления полевошпатовых материалов. Полевошпатовое сырье в различных отраслях используется либо в качестве плавня, глинозёмистого, или щелочного компонента, инертного наполнителя и т.д. В зависимости от назначения, потребители используют различное полевошпатовое сырьё с разным соотношением калия к натрию в его составе. Высококалиевое сырье, с калиевым модулем не менее 3-х, необходимо для электротехнической и абразивной промышленности, а также для производства сварочных электродов, наметились и другие направления его использования.

Основной объем учтенных в России запасов полевошпатового сырья представлен низкокалиевым полевошпатовым сырьем. Одним из источников высококалиевого сырья в России могут стать кварцевые порфиры месторождения Роза-Лампи, расположеного в Беломорском районе Карелии, представляющие собой новый тип высококалиевого кварц-полевошпатового сырья многоцелевого назначения.

Кислые вулканогенные породы в пределах месторождения представлены бурыми и зеленовато-тёмно-серыми туфосланцами, тёмно-серыми кварцевыми порфирами и лейкократовыми кварцевыми порфирами. Темно-серые кварцевые порфиры развиты в северо-западной части месторождения (рис. 1). Они фиксируются также среди лейкократовых в виде линзовидных и пластовых тел мощностью от 3–5 до 75 м. Иногда они наблюдаются в виде небольших ксенолитов мощностью 15–30 см. Контакты между темно-серыми кварцевыми порфирами постепенные, неясно выраженные. Между лейкократовыми и темно-серыми порфирами контакты отчетливые. Лейкократовая разновидность кварцевых порфиров образует два штока и является полезным ископаемым на месторождении Роза-Лампи. На выветренной поверхности они имеют совершенно белый цвет и фарфорвидный облик, на свежем изломе имеют светло-розовую, розовато-серую, зеленовато-розовато-серую окраску, массивную, либо в той или иной мере рассланцованную, текстуру [1]

Химический состав пород кислых вулканогенных пород месторождения Роза-Лампи представлен в табл. 1. Темно-серые кварцевые порфиры по химическому составу незначительно отличаются от лейкократовых. Темный цвет обуславливают более тонкие срастания биотита с полевым шпатом.

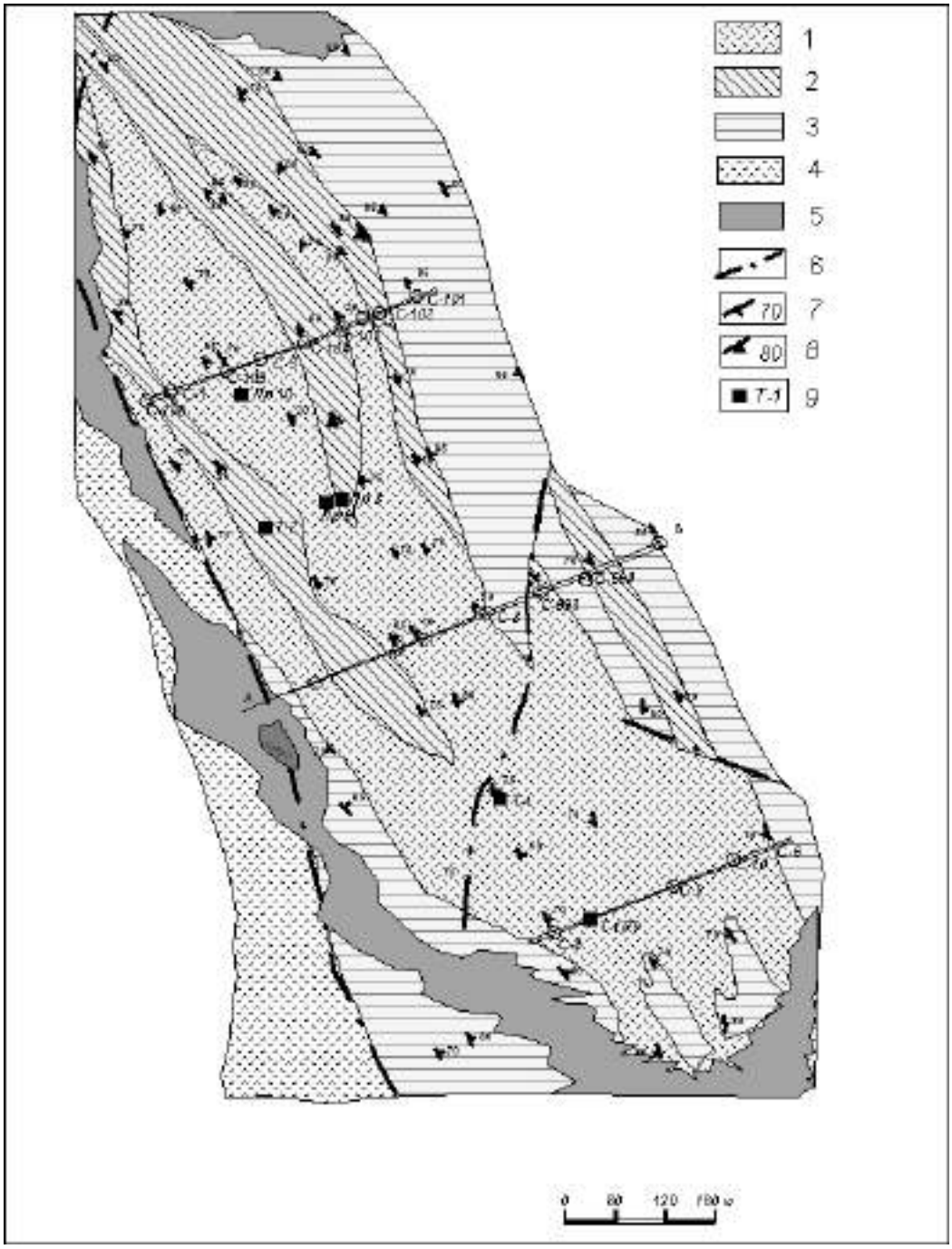



**Рис. 1. Схематическая геологическая карта месторождения Роза-Лампи (по Пекки, Кулмала, Белов, 1979). Условные обозначения: 1 – кварцевые порфиры лейкократовые; 2 – кварцевые порфиры темно-серые; 3 – сланцы туфогенные; 4 – метадиабазы, метамандельштейны, зеленые сланцы; 5 – болото; 6 – тектонические нарушения; 7 – элементы залегания сланцеватости; 8 – элементы залегания полосчатости; 9 –точки отбора проб**

Таблица 1. Средний химически состав кислых вулканогенных пород месторождения Роза-Лампи

| Оксиды | Кварцевые порфиры | | | | Туфосланцы |
|---|---|---|---|---|---|
| | Лейкократовые | | | Темно-серые | |
| | от | до | среднее | пр.11/75 | пр.14/75 |
| $SiO_2$ | 77,38 | 78,62 | 78,12 | 76,36 | 76,16 |
| $TiO_2$ | 0,20 | 0,27 | 0,22 | 0,22 | 0,41 |
| $Al_2O_3$ | 10,64 | 12,44 | 11,90 | 12,82 | 12,83 |
| $Fe_2O_3$ | 0,34 | 1,48 | 0,68 | 1,24 | 1,63 |
| FeO | 0,14 | 0,60 | 0,37 | 0,66 | 1,35 |
| MnO | 0 | 0,017 | 0,01 | 0,24 | 0,027 |
| MgO | 0 | 0,45 | 0,16 | 0,20 | 0,48 |
| CaO | 0 | 0,28 | 0,21 | н/обн. | 0,14 |
| $Na_2O$ | 0,39 | 0,59 | 0,16 | 0,80 | 0,99 |
| $K_2O$ | 7,32 | 8,06 | 7,64 | 7,14 | 4,19 |
| $H_2O$ | 0,04 | 0,10 | 0,09 | 0,21 | 0,09 |
| п.п.п. | 0.21 | 0,97 | 0,50 | 0,76 | 1,69 |
| $K_2O/Na_2O$ | | | 18 | 9 | 4–4,5 |

В основной массе породы устанавливается 35–50 % кварца, 40–50 % калиевого полевого шпата, до 10 % мусковита и 1–3 % биотита (табл. 2).

Таблица 2. Средний минеральный состав пород месторождения Роза-Лампи

| Порода | | Содержание, % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Микроклин | Плагиоклаз | Кварц | Мусковит | Биотит | Прочие |
| Кварцевые порфиры | Лейкократовые | 45,62 | 2,59 | 47,11 | 4,28 | 0,18 | 0,56 |
| | Темносерые | 45,23 | 1,63 | 43,88 | 8,00 | 1,21 | 0,10 |
| Туфосланцы | | 22,55 | 1,00 | 52,60 | 13,00 | 10,35 | 0,45 |

Характерной особенностью являются порфировые выделения, представленные, главным образом, голубым кварцем, размером от 0,5 до 3 мм (в среднем около 1 мм) и редко микроклин-пертитом.

Таблица 3. Характерные особенности кислых вулканитов месторождения Роза-Лампи

| Порода | Структура основной массы | Текстура | Количество порфировых выделений на $см^2$ | Размер чешуек, мм | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | биотита | мусковита |
| Туфосланцы | Микрогранобластовая | Полосчатая | 25 | 0,2–0,5 | 0,2–0,5 |
| Тёмно-серые кварцевые порфиры | Микрогранобластовая | Массивная слабо рассланцованная | 10 | 0,003–0,2 | 0,005–0,01 |
| Лейкократовые кварцевые порфиры | Фельзитовая | Массивная кварцитовая | 5–10 | нет | 0,1 |

Основная масса кварцевых порфиров сложена кварц-полевошпатовым агрегатом микрозернистого сложения с включениями тонкочешуйчатого (0,004×0,01 мм) мусковита, количество которого в породе варьирует от 5 до 25 %. Биотит встречен в виде тонких (0,02×0,2 мм) чешуек, ориентированных согласно прослоям мусковита. Из акцессорных минералов постоянно отмечаются апатит, рутил, карбонат и редко эпидот (рис. 2).

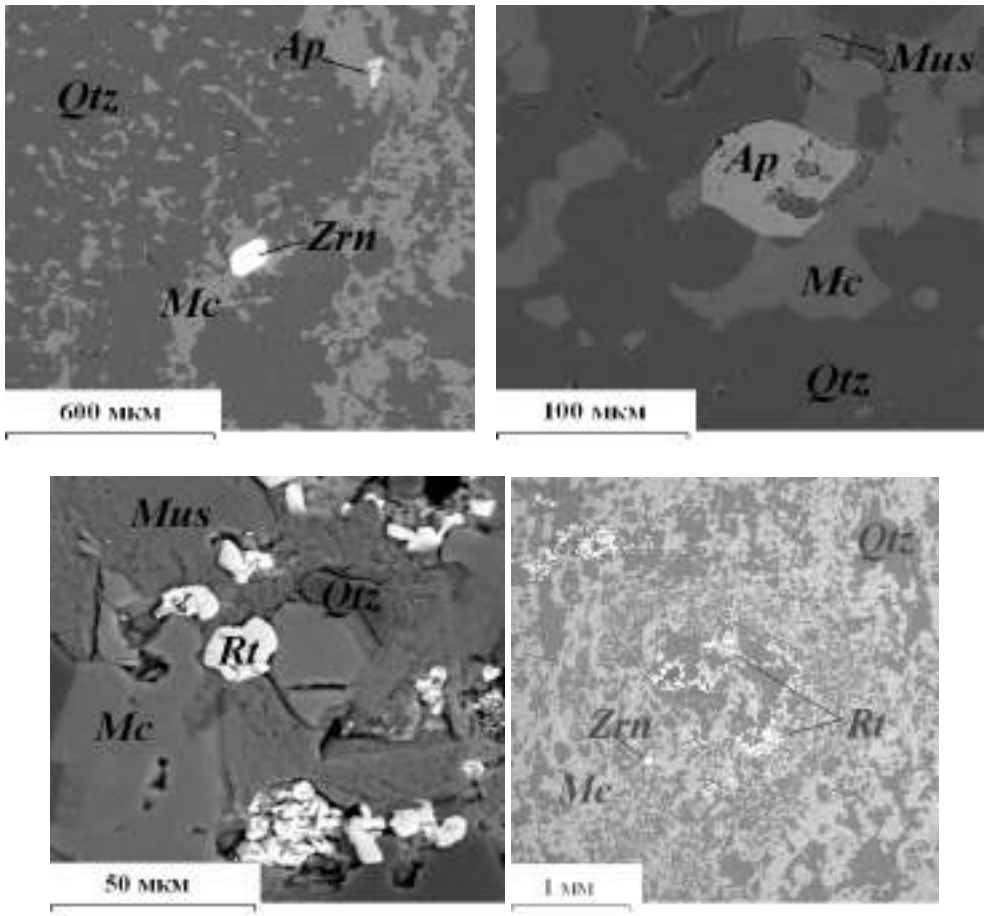



**Рис. 2. Характерные минеральные включения в лейкократовом кварцевом порфире: Mc – микроклин, Qtz – кварц, Ap – апатит, Zrn – циркон, Mus – мусковит, Rt – рутил (СЭМ VEGA II LMU)**

Порфировые включения образуют одиночные, либо агрегаты нескольких, как бы оплавленных, зерен диаметром 1–3 мм (рис. 3).

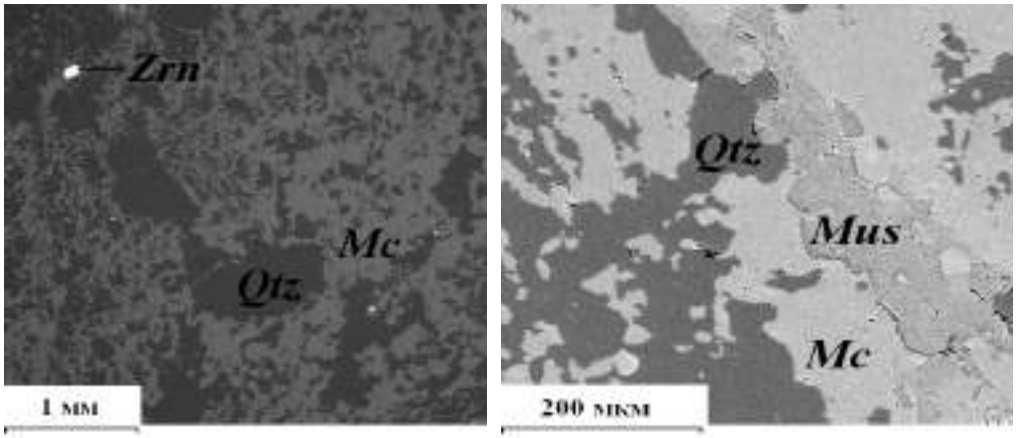



**Рис. 3. Порфировые выделения в общей массе породы: Qtz – кварц, Mc – микроклин, Zrn – циркон, Mus – мусковит (СЭМ VEGA II LMU)**

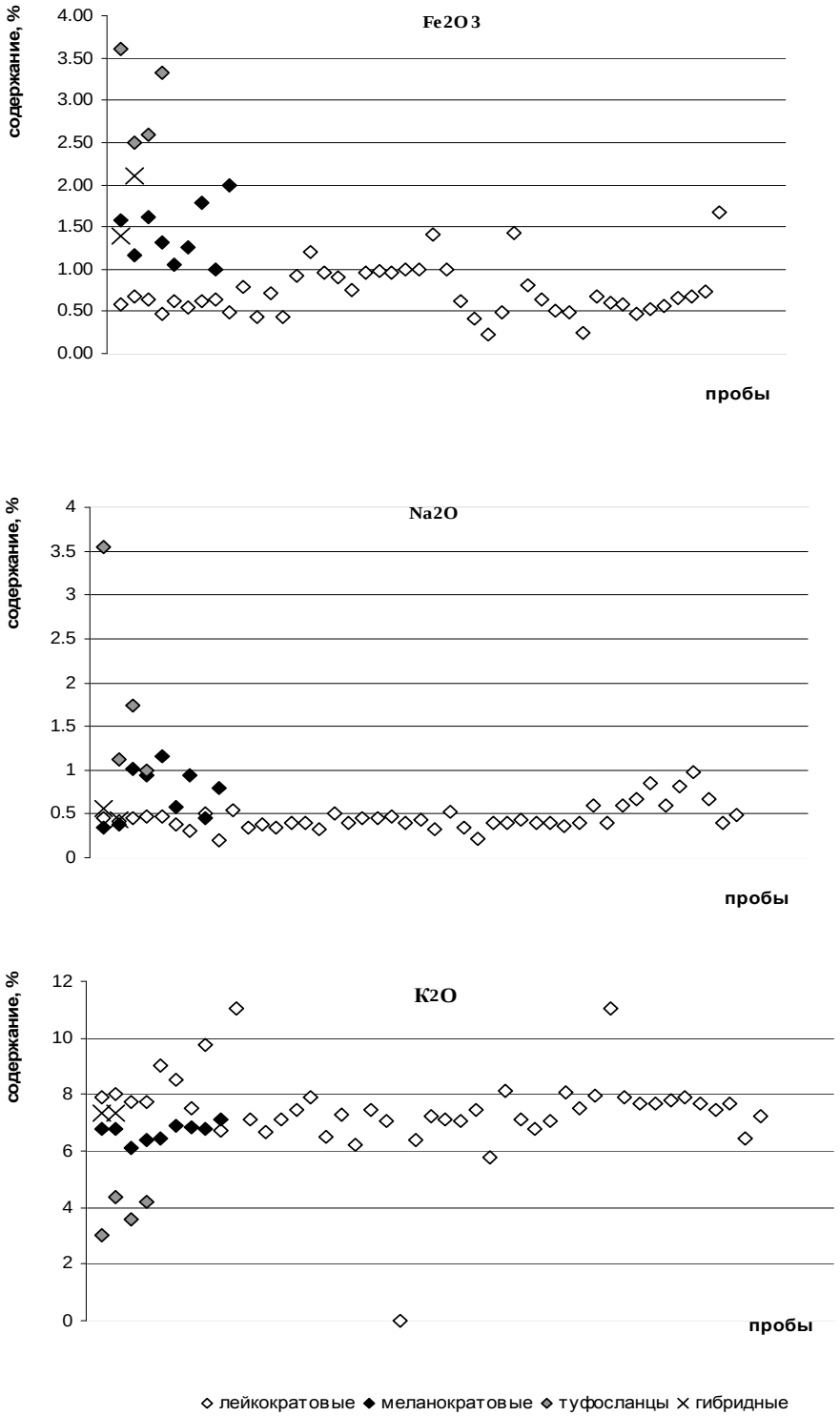



**Рис. 4. Вариации содержаний основных лимитируемых оксидов**

Суммарное количество кварцевых и полевошпатовых вкрапленников в лейкократовых кварцевых порфирах составляет 5–10 %, при существенном преобладании кварцевых. Кварцевые вкрапленники часто имеют идиоморфный облик, но нередко они раздроблены и отдельные обломки

сдвинуты друг относительно друга (катаклазированы). Полевошпатовые порфировые выделения (размером 2–3 мм в поперечнике) также раздроблены на мелкие куски, по которым наблюдается развитие мусковита.

Для технологических исследований опробование выполнено по двум магистральным разведочным канавам и горным выработкам. Химический состав кварцевых порфиров в общем достаточно выдержанный – для всех разновидностей характерно высокое содержание оксида калия и низкое (от десятых долей до 1,5 %) содержание оксида натрия. Содержание оксидов железа в них обычно ниже одного процента, причем наиболее маложелезистыми являются породы южной части месторождения (рис. 4)

Полуколичественным спектральным анализом установлено присутствие во всех разновидностях в значительных количествах Ba и Zr (рис. 5).

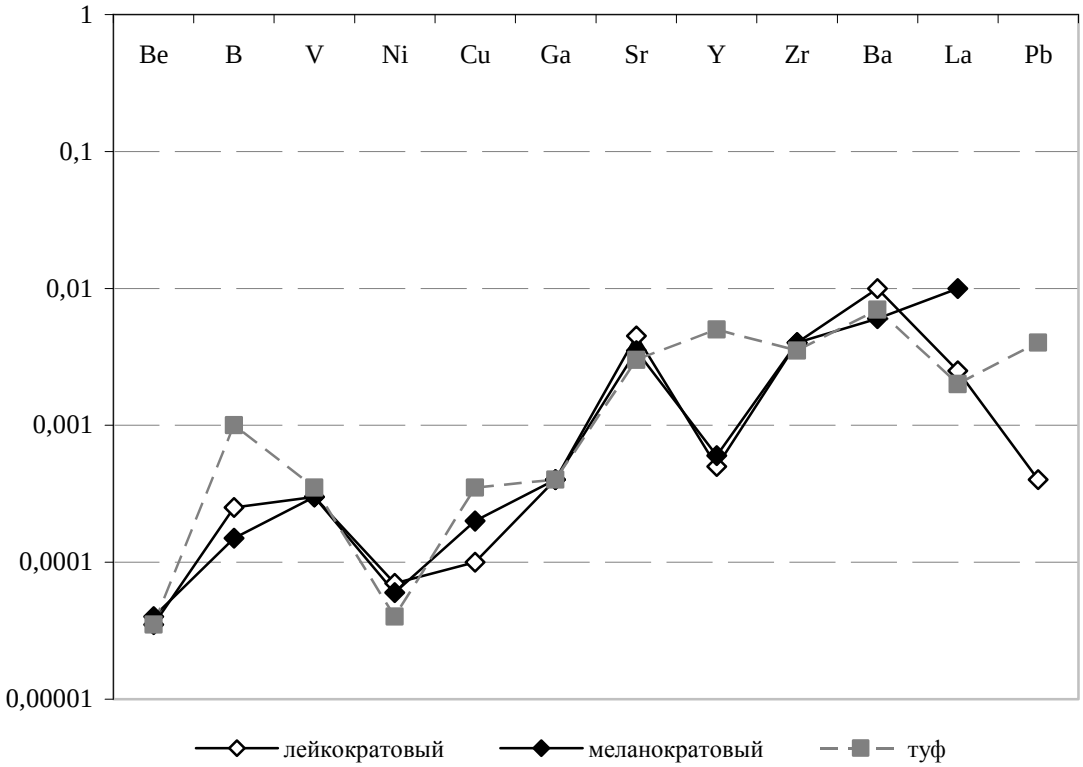



**Рис. 5. Вариации элементов-примесей в кварцевых порфирах, ppm**

Промышленную ценность представляют лейкократовые кварцевые порфиры.

При изучении образцов лейкократовых кварцевых порфиров на сканирующем электронном микроскопе установлено обогащение микроклина барием (рис. 6) и повсеместное присутствие включений циркона (рис. 7).

Кварц как фаза фарфора и его зернистость имеют весьма существенное значение. По данным [2] кварц с размером зерен 15–30 мкм повышает механическую прочность фарфора. Циркон в составе керамических масс повышает прочность, твердость, термостойкость и химическую стойкость фарфора [3] Потери электрического тока у фарфора с цирконием ниже, чем у обычного. Анализ вещественного состава показывает преимущества кислых вулканогенных пород перед традиционными пегматитами, при условии их легкой обогатимости..

Удаление железосодержащих примесей из породы наиболее рентабельно магнитной сепарацией. Сухая магнитная сепарация тонкозернистых пород малоэффективна, так как получить кварц-полевошпатовый концентрат, содержащие менее 0,3 % $Fe_2O_3$ сложно. Опыты полиградиентной сепарации лейкократовых кварцевых порфиров, показали перспективность этого метода [4]/

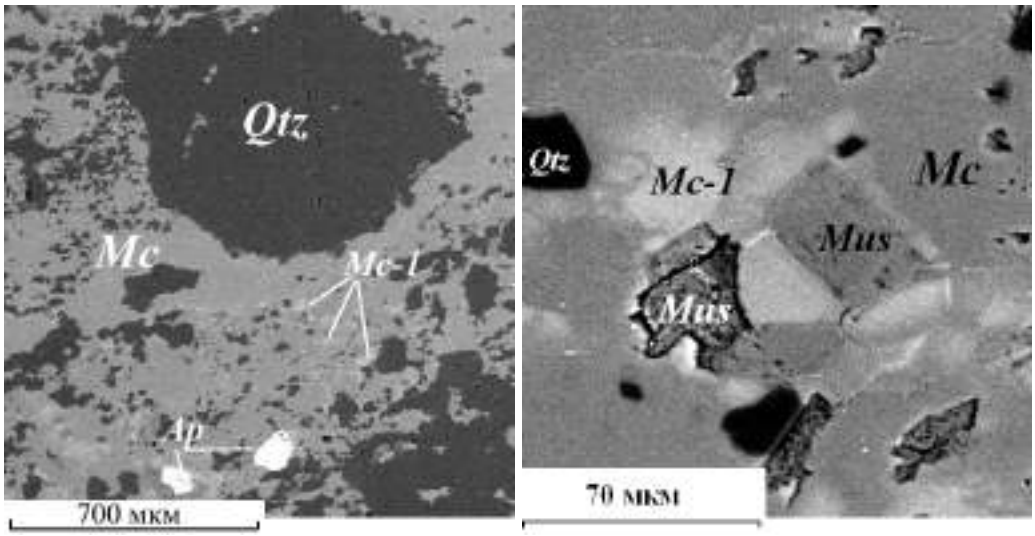



**Рис. 6. Участки микроклина, обогащенные барием (уч. Mc-1 содержит 2,66 % бария): Mc – микроклин, Ap – апатит, Qtz – кварц, Mus – мусковит (СЭМ VEGA II LMU)**

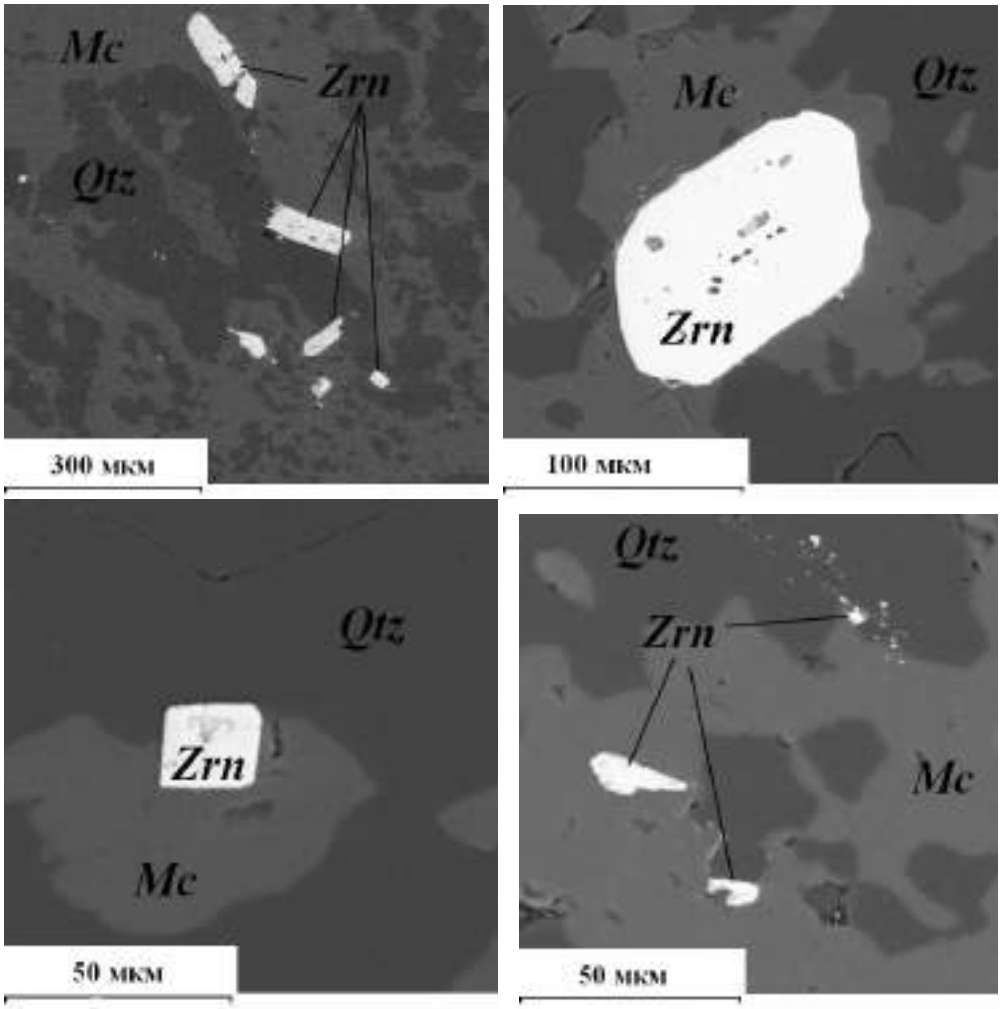



**Рис. 7. Морфология включений циркона в лейкократовом кварцевом порфире: Mc – микроклин, Qtz – кварц, Zrn – циркон (СЭМ VEGA II LMU)**

Содержания основных компонентов в кварц-полевошпатовом концентрате и его выход показаны в табл. 4.

По заключению Института электрокерамики (ВНИИЭК) кварц-полевошпатовые концентраты из кварцевых порфиров признаны высококачественным сырьём для производства высоковольтного электротехнического фарфора. Присутствие циркония и бария (до 2 % в сумме) в коллективном кварц-полевошпатовом концентрате повышает эксплуатационные характеристики фарфора.

Таблица 4. Технологические показатели обогащения лейкократовых кврцевых порфиров

| Метод обогащения | Концентрат | Технологические показатели, % | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Выход | Содержание | | |
| | | | $Fe_2O_3$ | $Na_2O$ | $K_2O$ |
| Мокрая магнитная сепарация | Кварц-полевошпатовый | 70,31–79,71 | 0,14–0,18 | 0,4–0,50 | 7,04–7,75 |

Ввод в эксплуатацию кварцевых порфиров месторождения Роза-Лампи позволит отказаться от устаревшей технологии переработки пегматитового полевошпатового сырья, основанной на ручной рудоразборке в голове процесса, и получать концентраты, уникальные по составу (калиевый модуль 7–9), аналогов которым нет во всём мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пекки А.С., Разоренова В.И. Месторождения полевошпатового сырья в Карелии. Л.: Наука, 1977. 182 с.
2. Химическая технология керамики. Под ред. И.Я. Гузмана. М. 2003. 493 с.
3. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 500 с.
4. Каменева Е.Е. Скамницкая Л.С. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск, 2003. 227 с.

## ОЦЕНКА МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕМОЛИТ-АКТИНОЛИТОВЫХ ПОРОД КАРЕЛИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИКИ

***Попова Т.В., Ильина В.П., Климовская Е.Е., Фролов П.В., Инина И.С.***

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

Комплексное использование минерального сырья – одна из актуальнейших проблем современной горно-промышленной отрасли. Оно связано с необходимостью утилизации больших объемов отходов при добыче различных полезных ископаемых с целью снижения экологического ущерба окружающей среде и повышения экономической эффективности добычи. Кроме того, для экономического развития любого региона важно использование местных видов минерального сырья, причем не просто добывая его, а находя оптимальные направления переработки и использования. Одно из основных направлений использования попутного, в том числе нетрадиционного минерального сырья – производство строительной керамики, позволяющее утилизировать большие объемы разнообразных отходов.

К нетрадиционным видам магнезиального сырья для строительной керамики относятся тремолитсодержащие породы, которые являются попутными для тальковых руд, а также поступают в отвалы при добыче блочного и облицовочного камня

На основе литературных данных и патентных исследований установлено, что на основе тремолитсодержащих пород разработана электротехническая и радиокерамика с диопсидовой кристаллической фазой, характеризующаяся высокой механической прочностью и высокой химической стойкостью. Кроме того, диопсид не имеет полиморфных превращений, следовательно,

акая керамика не подвержена «старению», низкий коэффициент термического расширения диопсида ($65*10^{-7}$ $^{0}C^{-1}$) обуславливает высокую термостойкость такой керамики. Исследованиями по получению диопсидовой керамики из различных минералов (талька, тремолита) и чистых оксидов установлено, что диопсид лучше всего синтезируется на основе тремолита (использовались тремолиты Алгуйского месторождения), что обусловлено близостью параметров кристаллических решеток диопсида и тремолита и наличием в составе тремолита оксидов магния и кальция [1].

В процессе проведения работ по изучению высокомагнезиального сырья Карелии нами выделено несколько объектов тремолитсодержащих пород (рис. 1). Для исследования были отобраны пробы, содержащие моноклинные амфиболы минералогического ряда тремолит-актинолит на следующих объектах: месторождение Каллиево-Мурененваара Сегежского района, участок Хаутаваара Суоярвского района, объект «Озерки-1» района г. Костомукша. Эти объекты изучались ранее с целью добычи блочного и облицовочного камня.

**Рис. 1. Схема размещения объектов тремолитсодержащих пород: 1 – Каллиево-Муренанваара, 2 – Озерки, 3 – Хаутаваара**

Целью данной работы является исследование минералого-технологических свойств тремолит-актинолитсодержащих пород Карелии для получения на их основе высокопрочной керамики с диопсидовой кристаллической фазой при пониженной температуре обжига. Исследованы минеральный и химический состав природных тремолит-актинолитсодержащих пород, процессы фазообразования при их термической обработке.

Месторождение талькового камня Каллиево-Муренанваара Сегозерской группы расположено на южном берегу оз. Сегозеро, в 15 км западнее железнодорожной станции Масельгская. Линза карбонат-хлорит-тальковых пород вытянута в широтном направлении на 450 м и залегает между гнейсо-гранитами и серпентинизированными метапикритами. Мощность линзы около 65 м, падение пород северо-западное под углом от 40 до 60º. Буровыми скважинами залежь карбонат-хлорит-тальковых пород прослежена до глубины 100 м; с глубиной наблюдается уменьшение мощности. В приконтактовых с вмещающими гранитоидами участках развиты зоны хлорит-тремолит-актинолитовых пород мощностью от первых до 10 м. Для изучения были отобраны две пробы тремолит-актинолитовых пород (№№ 505, 506) из зоны контакта ультрамафитов с вмещающими гранитоидами.

Месторождение Озерки расположено в южной части Костомукшской зеленокаменной структуры и приурочено к коматиитам рувинваарской свиты контокской серии неоархея. Залежи талькового камня представляют собой крутопадающие пластообразные тела северо-восточного простирания размером 130×300 м (участок Озерки-1) и 350×450 м (участок «Зеленая горка») и образованы по переслаивающимся дифференцированным лавовым потокам. Хлорит-тремолитовые породы образуют линзообразные и пластовые тела в толще тальксодержащих пород и преимущественно

слагают верхние части потоков. Проба для исследований OZ-10 отобрана из керна скважины № 10 участка Озерки-1 (гл.37,2-37,39 м.), из верхней части лавового потока со структурой спинифекс.

Из метаморфизованных перидотитовых коматиитов Хаутаваарской структуры Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса в районе ж/д станции Хаутаваара (Суоярвский район) отобраны пробы Х-014, Х-015, Х-016, Х-030, Х-031. Породы в целом однородные, зеленовато-синевато-серые, с поверхности до коричневато-бурых, тонкозернистые массивные, с зонами карбонатизации. Минеральный состав пород (по 5 пробам): серпентин – 16 – 30 %, хлорит – 28 – 40 %, тремолит – 33 – 50 %, оливин, магнетит, пентландит, хромит.

Минеральный состав пород, а также образующихся при их термообработке новых кристаллических фаз исследован методами петрографического анализа; рентгенофазового анализа на дифрактометре ARL X'TRA с излучением CuKα в области углов $2\Theta=2\text{-}90^0$ с использованием программы Siroquant; дифференциально-термического анализа с использованием синхронного термического анализатора STA 449 F1 Jupiter; микрозондового анализа на электронном микроскопе VEGA 2 LSH с приставкой для микроанализа.

Минеральный состав исследованных проб представлен в таблице 1. По данным РФА установлено, что проба OZ- 010 (уч. Озерки-1) состоит из хлорита и амфибола тремолит-актинолитового ряда, кроме того, присутствует магнетит, незначительное количество талька. В пробах 505 и 506 (м-е Каллиево-Мурененваара) амфибола тремолит-актинолитового ряда в 2 раза больше, чем в пробе OZ-010. Пробы уч. Хаутаваара, кроме хлорита и амфибола тремолит-актинолитового ряда, содержат значительное количество серпентина, а также незначительное количество реликтов оливина (по данным РФА, оптической и электронной микроскопии – рис. 2).

Таблица 1. Минеральный состав пород (по данным РФА)

| Месторождение, проба | Хлорит | Амфибол | Тальк | Серпентин | Магнетит |
|---|---|---|---|---|---|
| Озерки OZ- 010 | 55 | 33 | 5 | - | 7 |
| Каллиево-Мурененваара: пр. 506 | 30 | 70 | - | - | - |
| Каллиево-Мурененваара: пр. 505 | 24 | 75 | 1 | | |
| Хаутаваара, проба Х-014 | 28,5 | 44 | - | 27,5 | - |
| Хаутаваара, проба Х-015 | 29,1 | 51,5 | - | 19,4 | - |
| Хаутаваара, проба Х-016 | 33,1 | 44,7 | - | 22,3 | - |
| Хаутаваара, проба Х-030 | 33 | 50,9 | - | 16,1 | - |
| Хаутаваара, проба Х-031 | 43,2 | 33,6 | - | 23,2 | - |

Данные микрозондового анализа и расчет по классификации Leake [2] показали, что в пробах уч. Хаутаваара и в пробе OZ-010 участка Озерки-1 амфибол представлен тремолитом, в пробах м-я Каллиево-Муренанваара – актинолитом. По данным петрографического анализа размер зерен тремолита в пробе Х-015 – от 1 до 200 мкм, в пробе OZ-010 – от 1 до 400 мкм, размер зерен актинолита в пробе 505 – от 40 до 3300 мкм, в пробе 506 – от 40 до 5500 мкм. На рис. 2 и 3 показаны формы выделения тремолита и актинолита в исследованных пробах, а в таблице 2 – средний состав тремолита и актинолита по данным микрозондового анализа.

Таблица 2. Средний состав амфиболов

| № пробы | $SiO_2$ | FeO | MgO | CaO | $Al_2O_3$ | Сумма |
|---|---|---|---|---|---|---|
| OZ-010 | 56,91 | 5,17 | 21,78 | 12,27 | 0,76 | 96,89 |
| Х-015 | 55,55 | 3,65 | 21,88 | 12,81 | | 93,9 |
| 505 | 55,69 | 7,04 | 19,26 | 12,74 | 0,57 | 95,3 |
| 506 | 53,55 | 7,64 | 18,37 | 12,41 | 0,87 | 92,85 |

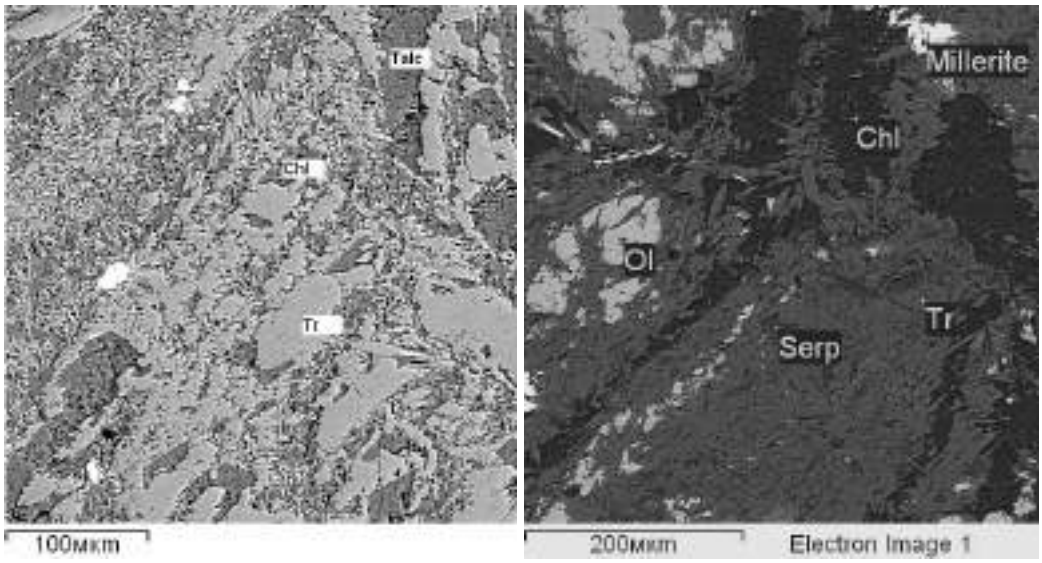



**Рис. 2. Микроструктуры пород участка Озерки-1 (слева) и Хуатаваарской структуры (справа)**

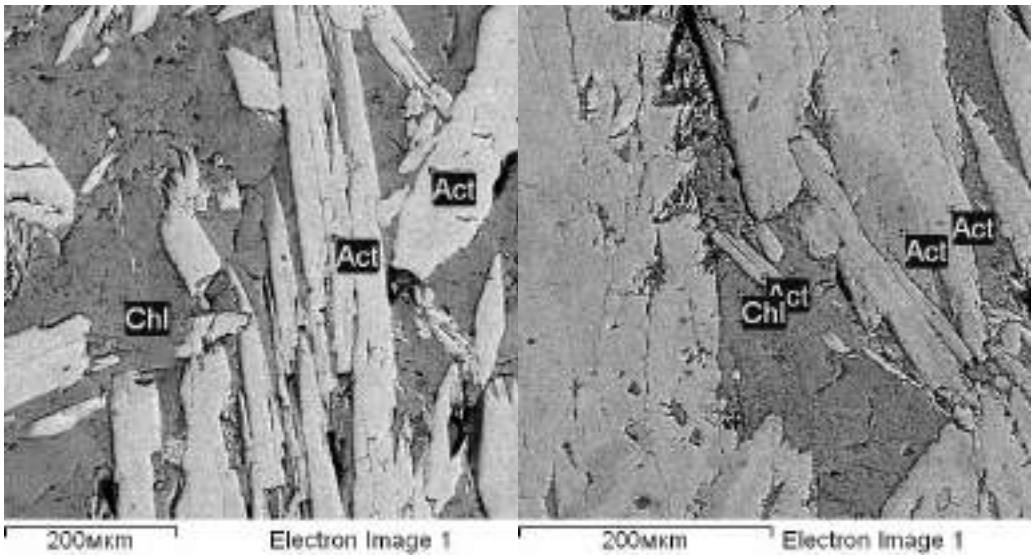



**Рис. 3. Микроструктуры пород месторождения Каллиево-Мурененваара**

В таблице 3 приведен химический состав проб, выбранных для технологических испытаний. Пробы отличаются по содержанию магния, кальция и кремнезема. Необходимо сразу отметить высокое содержание железа во всех пробах, что делает их непригодными для получения радиокерамики, но позволяет получать с использованием данного сырья строительную керамику.

Методом ДТА исследовано поведение выбранных проб при термообработке, установлены температуры, при которых происходит дегидратация, разрушение структуры хлорита, тремолита, актинолита, серпентина и появление новых кристаллических фаз. На кривых ДТА (рис. 4) отмечаются: два эндоэффекта, связанные с дегидратацией хлорита - в области от 576$^0$С (Х-015) до 640$^0$С (№ 506) и в интервале 800-815$^0$С; эндоэффект около 750$^0$С, относящийся к разложению серпентина (проба Х-015), переходящий в экзоэффект около 840$^0$, относящийся к кристаллизации форстерита из хлорита и серпентина.[3,4,5] Необходимо отметить, что в пробе 506 удаление структурной воды из хлорита характеризуется только эндоэффектом около 640$^0$С, эндоэффект при 814$^0$С выражен очень слабо и экзоэффект около

841$^0$С, характеризующий кристаллизацию форстерита, также довольно слабо выражен по сравнению с пробами X-015 и OZ-010. Это связано с различием химического состава хлорита пробы 506 и двух других проб. По данным [6], «интенсивность экзоэффекта падает с уменьшением содержания в хлорите MgO» (по данным микрозондового анализа хлорит в пробе 506 относится к железисто-магнезиальным хлоритам, а в X-015 и OZ-010 – к магнезиальным).

Таблица 3. Химический состав проб

| Окислы | X-015 | OZ-010 | 506 | 505 |
|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 44,9 | 39,06 | 50,58 | 50,38 |
| TiO2 | 0,20 | 0,55 | 0,10 | 0,16 |
| Al2O3 | 4,58 | 8,29 | 4,66 | 4,89 |
| Fe2O3 | 3,88 | 5,25 | 1,05 | 1,77 |
| FeO | 4,6 | 9,34 | 8,84 | 7,61 |
| MnO | 0,137 | 0,142 | 0,333 | 0,33 |
| MgO | 28,54 | 24,50 | 19,95 | 21,57 |
| CaO | 5,81 | 4,39 | 9,70 | 9,63 |
| Na2O | 0,13 | 0,18 | 0,16 | 0,11 |
| K2O | 0,02 | < 0,01 | 0,03 | 0,02 |
| H2O | 0,23 | 0,49 | 0,29 | 0,21 |
| ппп | 6,55 | 7,50 | 3,83 | 2,84 |
| P2O5 | 0,07 | 0,14 | 0,07 | 0,05 |
| Сумма | 99,83 | 99,842 | 99,59 | 99,57 |

Эндоэффект около 1000**°С** свидетельствует об удалении кристаллизационной воды с разрушением структуры тремолита и актинолита.

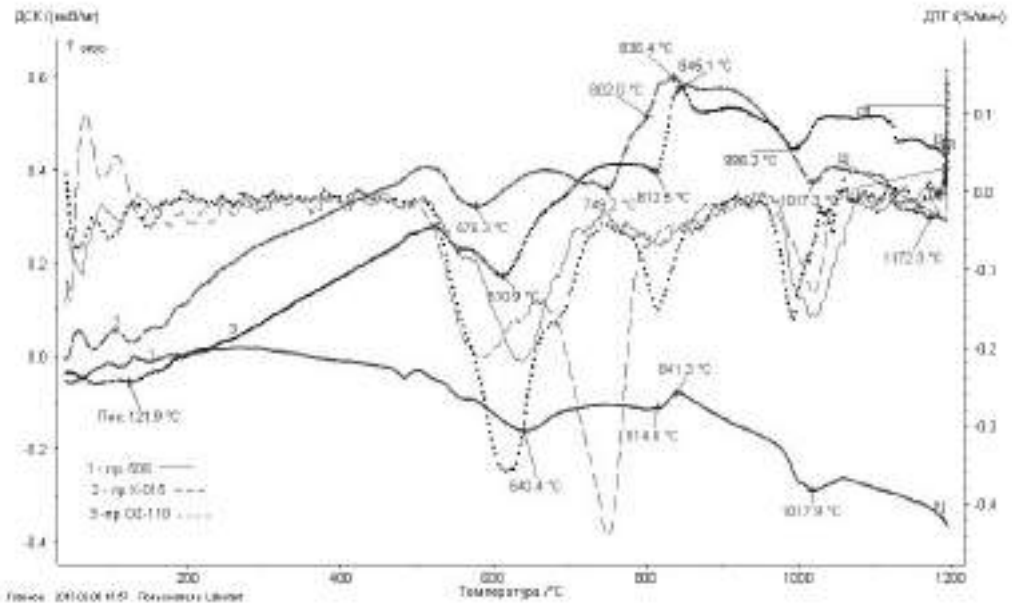



**Рис.4 Кривые ДТА и ДТГ исследованных пород**

Как следует из данных ДТА, разложение тремолита начинается при температуре около $950^0$С, максимум эндоэффекта приходится на температуру около 1000–$1020^0$С. На основании этого были выбраны две температуры термообработки проб - 1000 и $1100^0$С. Фазовый состав проб, подвергнутых термообработке при данных температурах в течение двух часов, приведен в табл.4.

По данным РФА и микрозондового анализа, основной кристаллической фазой, образовавшейся при разложении тремолита и актинолита, является высококальциевый клинопироксен с повышенным содержанием оксида кремния. Кроме того, в пробах Х-015 и OZ-010 после термообработки при $1000^0$С регистрируется энстатит, являющийся одним из продуктов разложения тремолита (актинолита). В пробе 506 энстатит регистрируется только после термообработки при $1100^0$С, а при $1000^0$С в этой пробе еще фиксируются следы актинолита, что, вероятно, объясняется существенно большей крупностью зерен амфибола в пробе 506 по сравнению с двумя другими. На кривых ДТА, приведенных на рис.4, также видно, что разложение амфибола начинается при меньшей температуре в пробе OZ-010, а при большей – в пробе 506. Из разложившегося серпентина в пробе Х-015 образуется форстерит, что подтверждается РФА. Исходя из литературных данных, форстерит также может образоваться при разложении хлорита, но в термообработанных пробах 506 и OZ-010 он не обнаруживается совсем. По-видимому, из продуктов разложения хлорита образуется энстатит [5], что подтверждается данными РФА: в пробе OZ-010, содержащей наибольшее количество хлорита, количество энстатита после термообработки при $1100^0$С значительно увеличивается. Магнетит в пробе OZ-010 переходит в гематит. Кристобалит является одним из продуктов разложения амфибола. [3].

Таблица 4. Фазовый состав термообработанных проб

| Проба / Условия термообработки | № 506, 505 | Х-015 | OZ-010 |
|---|---|---|---|
| $1000^0$С | Высококальциевый клинопироксен, следы актинолита | Высококальциевый клинопироксен, форстерит, энстатит | Высококальциевый клинопироксен, энстатит, гематит |
| $1100^0$С | Высококальциевый клинопироксен, энстатит, кристобалит | Высококальциевый клинопироксен, форстерит, энстатит | Высококальциевый клинопироксен, энстатит, гематит |
| $1200^0$С +карбонатит | Высококальциевый клинопироксен (около 60 %), энстатит, кристобалит, гематит | Высококальциевый клинопироксен (около 30%), форстерит, окерманит, кристобалит | Высококальциевый клинопироксен (около 30 %), энстатит, окерманит, гематит |

Для исследования возможности получения керамики с диопсидовой кристаллической фазой были составлены шихты на основе исследованных проб и необходимого количества карбонатита Тикшозерского месторождения (карбонатит использовался для введения в шихту дополнительного количества кальция с целью получения пироксена, близкого по составу к диопсиду). Шихты обжигались при температуре $1200^o$С в течение 2 часов. По результатам РФА установлено, что введение дополнительного количества кальция посредством карбонатита способствует увеличению количества пироксена ряда диопсид-авгит в керамике, получаемой из всех исследованных проб, при этом максимальное количество данной кристаллической фазы фиксируется в керамике на основе проб 505 и 506 - с самым большим содержанием амфибола.

На основе местной глины Ивинского месторождения с добавкой пробы 506 в количестве 30% при $1100^o$С была получена керамической плитка, прочность которой оказалась в 1,5 раза выше по сравнению с керамической плиткой, выпускаемой Никольским керамическим заводом.

**Выводы.** В результате исследования метасоматитов месторождения Каллиево-Мурене16нваара, метакоматиитов участка Озерки-1 установлено, что они состоят из хлорита и амфиболов ряда тремолит-актинолит, метакоматииты участка Хаутаваара, кроме того, содержат серпентин. Пробы отличаются по минеральному и химическому составу, размеру зерен тремолита 157 (актинолита), что оказывает значительное влияние на фазовый состав керамики.

При термообработке при 1000-1100$^0$С тремолит-актинолитсодержащих пород основной образующейся кристаллической фазой является высококальциевый клинопироксен, кроме того, образуются форстерит и энстатит. При увеличении температуры обжига количество высококальциевого пироксена увеличивается. Добавка карбонатита Тикшозерского месторождения способствует увеличению количества пироксена ряда диопсид-авгит.

Результаты исследований показали, что актинолитовые породы месторождения Каллиево-Муренанваара являются наиболее перспективным сырьем для получения керамики с диопсидовой кристаллической фазой.

Использование тремолит- и актинолитсодержащих отходов от добычи блочного камня для получения строительной керамики может способствовать решению проблемы их утилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усов П.Г., Коновалова З.С., Верещагин В.И. Получение керамики с диопсидовой кристаллической фазой на основе тремолита // Известия Томского политехнического университета. Томск, 1975. - Т. 250.- С. 36-39.
2. Leak B. E. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names // The Canadian Mineralogist. 1997. Vol. 35, pp. 219-246.
3. Минералы. Справочник. Т.III. Вып.3. М., Наука. 1981. С.78-79.
4. Минералы. Справочник. Т.IV. Вып.1. М., Наука. 1992. С.142-143.
5. Минералы. Справочник. Т.IV. Вып.2. М., Наука. 1992. С.140-141.
6. Термический анализ минералов и горных пород. Л., «Недра», 1974. 399с.

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЦИРКОНА В ПРОЦЕССАХ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

***Кевлич В.И., Кукушкина П.И., Трифонова А.В.***

ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

В геолого-минералогических исследованиях определенное место занимает изучение акцессорных минералов. Спектр использования акцессорных минералов весьма широк, в особенности, циркона, который, наряду с использованием в промышленности [1, 2], находит применение в качестве основного минерала для определения возраста пород. Для выделения циркона из горных пород и руд различного генезиса, отличных по текстурным и структурным параметрам, минеральному составу, содержанию циркона (от первых процентов до десятых-тысячных долей) необходимо использовать комплекс обогатительных методов.

В горных породах и рудах Карелии, претерпевших процессы полиметаморфизма, тектоники, метасоматоза, гипергенеза, циркон присутствует не только в виде идиоморфных или ксеноморфных зерен, но также в форме обломков, разупрочненных зерен за счет макро- и микродефектов. Циркон может состоять из однородных и сложных, претерпевших обрастание, регенерацию, и зональных зерен, состоящих из нескольких разновидностей циркона с различным коэффициентом удлинения и размерами зерен [3], присутствием ядер, включениями рудных и нерудных минералов с вариативностью технологических свойств. В этой связи такие горные породы и руды относятся к весьма бедным и труднообогатимым. Важно учитывать, что при дроблении, измельчении происходит разрушение зерен циркона, что приводит к появлению осколков размером от десятых, сотых, тысячных долей миллиметра и до наночастиц. В связи с этим требуется информация не только о текстурно-структурных особенностях, морфологии, физико-механических свойствах циркона, но и о

факторах, которые способствовали разупрочнению и, соответственно, разрушению кристаллов циркона в породе и процессах дробления и измельчения [4].

Среди основных методов изучения, как правило, используются методы оптической микроскопии (петрографический, оптико-минералогический, оптико-геометрический и др.). Методы выбираются в зависимости от поставленных задач. Таким образом, генезис руд и горных пород, с одной стороны, недостаточная селективность процессов рудоподготовки, с другой, определяют раскрытие и сохранение циркона в процессах дробления, измельчения и возможные потери при обогащении.

Как показывает практика, в лабораторную обработку для выделения циркона вовлекаются горные породы и руды, которые относятся к бедным и труднообогатимым, и циркон представлен в них сложными морфоструктурными зернами и отличается тесным срастанием с минералами породы, неравномерным и тонким гранулометрическим составом (рис. 1, 2), неоднородностью строения. И в этой связи представляет интерес комплексное использование современных методов: оптических – лазерного микроскопа, микрозонда и др., и обогатительных методов для определения минерального состава, ассоциаций циркона в породе, степени раскрытия циркона, выявления морфологии зерен, диагностики обломков и вновь образованных фракций циркона (осколки, микрозерна, шламы), гранулометрии, включений и дефектов в цирконе.

В конкретном случае изучение цирконов осуществлялось на пробах мелкозернистых кислых вулканитах участка Вокнаволок.

По данным минералогического анализа кислые вулканиты представлены: тонкозернистыми измененными агрегатами по вулканическому стеклу, состоящими по результатам рентгенофазового анализа из плагиоклаза, амфибола, слюды и др. В шлифах циркон представлен в виде идиоморфных и изометричных бледнорозовых зерен с микроскопически неровными краями (рис. 1). По периметру циркона видны бурые пленки гидроокислов, «разрыхляющие» границы срастания с тонкозернистыми агрегатами по вулканическому стеклу (альбит и средний плагиоклаз, темноцветные включения – магнетит, амфибол, ильменит и др.).

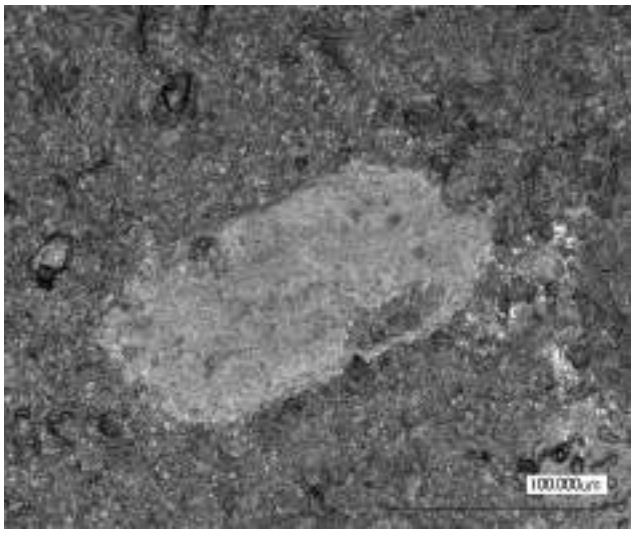



**Рис. 1. Циркон в породе**

Основу кислых вулканитов составляют измененные агрегаты, состоящие из плагиоклаза и тонкозернистых меланократовых минералов, твердость которых ~ 5–6, что существенно меньше, чем твердость циркона – 7,5. Кроме того, благоприятным фактором рудоподготовительных операций (дробление, измельчение) для последующего обогащения пород с целью выделения циркона являются особенности морфологии циркона и отсутствие спайности. Вместе с тем наличие среди цирконов сложных зерен (регенерация, обрастания, включения, микротрещины и др.,

обусловленные процессами метаморфизма) негативно влияет на процесс дезинтеграции пород. В этой связи и с учетом содержания циркона (табл. 1) – 0,019 %, важным этапом становится определение гранулометрического состава циркона с применением ситового анализа (рис. 2), что позволяет осуществить выбор крупности измельчения для последующей разработки схемы обогащения.

Технология выделения циркона предусматривает дробление, измельчение проб до класса крупности -0,5 мм и рассев пробы на стандартных ситах на фракции (табл. 1). Полученные фракции подвергались разделению по плотности в тяжелых жидкостях (бромоформ) и по магнитным свойствам в слабых и сильных полях для концентрации и выделения циркона. Доводка концентратов циркона до мономинеральной фракции осуществлялась под микроскопом. Процентное содержание циркона во фракциях и в пробе приведено в табл. 1 и на рис. 3. Подробное минералого-технологическое изучение зерен циркона включало использование оптических методов исследования с применением оптических микроскопов, лазерного сканирующего микроскопа и электронного микроскопа VEGA II LSH (фирмы Teskan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 в ИГ КарНЦ РАН.

Таблица 1. Содержание циркона в классах крупности кислых вулканитов

| Классы крупности мм | Выход классов % | Выход тяж. немагнитной фр. % | Содерж-циркона в фракциях | Содерж. идиомор-фных цирконов фракции% | Содерж. обломков циркона фракции % | Содерж. осколков циркона фракции % | Количество Зерен циркона |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 44,9 | 0,008 | 0,00002 | 50 | - | 50 | 4 |
| 0,16 | 7,7 | 0,018 | 0,0001 | 20 | - | 80 | 10 |
| 0,1 | 12,9 | 0,026 | 0,001 | 15 | 5 | 80 | 265 |
| 0,071 | 5,3 | 0,064 | 0,0076 | 23,7 | 5,8 | 70,5 | 913 |
| 0,05 | 3,9 | 0,085 | 0,0087 | 43,3 | 0,6 | 56,1 | 2100 |
| -0,05 | 25,6 | 0,1 | 0,0018 | - | - | 100 | 14 |
| - | 100 | - | 0,019 | - | - | - | 3306 |

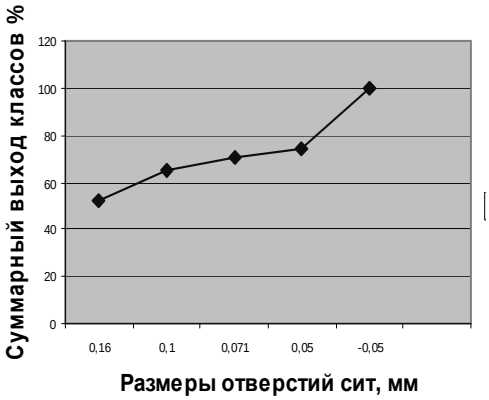



**Рис. 2. Результаты ситового анализа кислых вулканитов**

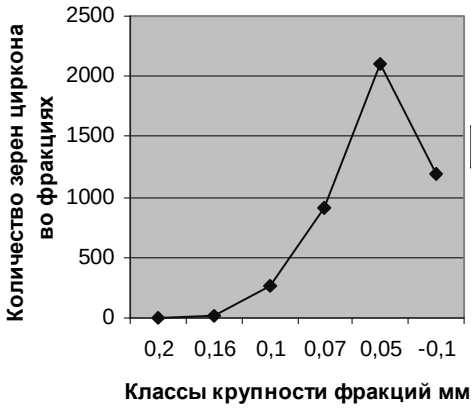



**Рис. 3. Содержание циркона во фракциях кислых вулканитов**

Полученные данные (табл. 1) и микроскопическое изучение свидетельствуют о присутствии во фракциях раздробленного материала – идиоморфных кристаллов циркона, обломков и осколков (рис. 4–9).

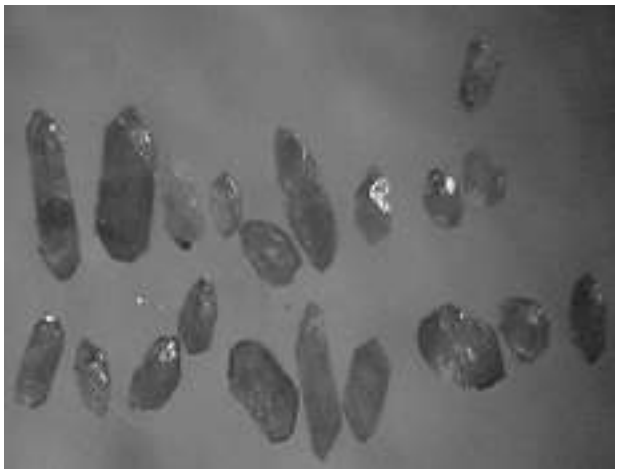


**Рис. 4. Идиоморфные зерна циркона**

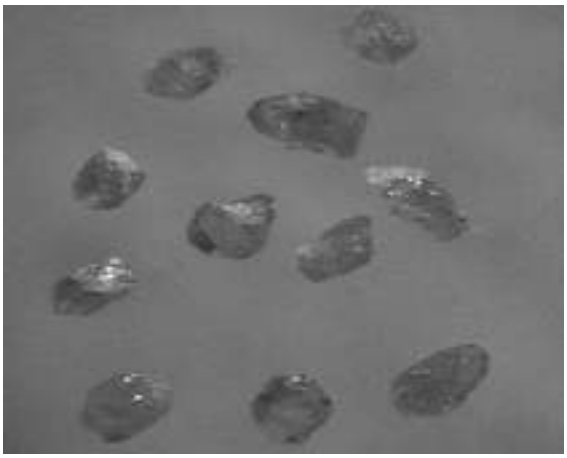


**Рис. 5. Обломки циркона**

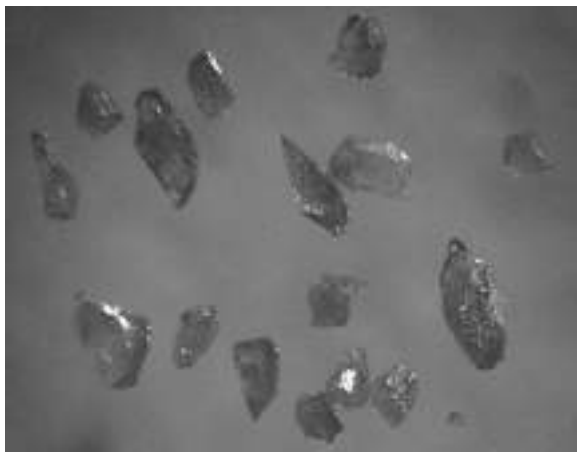


**Рис. 6. Осколки циркона**

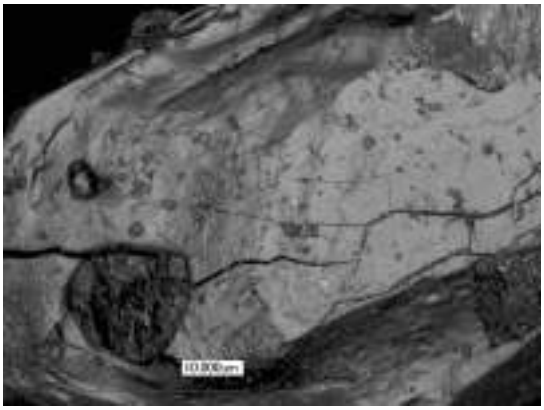


**Рис. 7. Включения и микротрещины по зерну циркона**

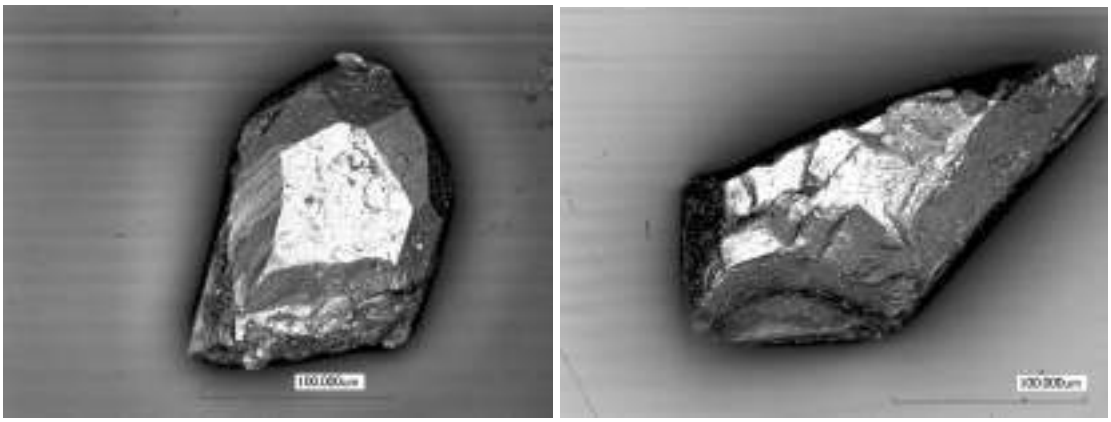


**Рис. 8. Осколки зерен циркона в кислых вулканитах**

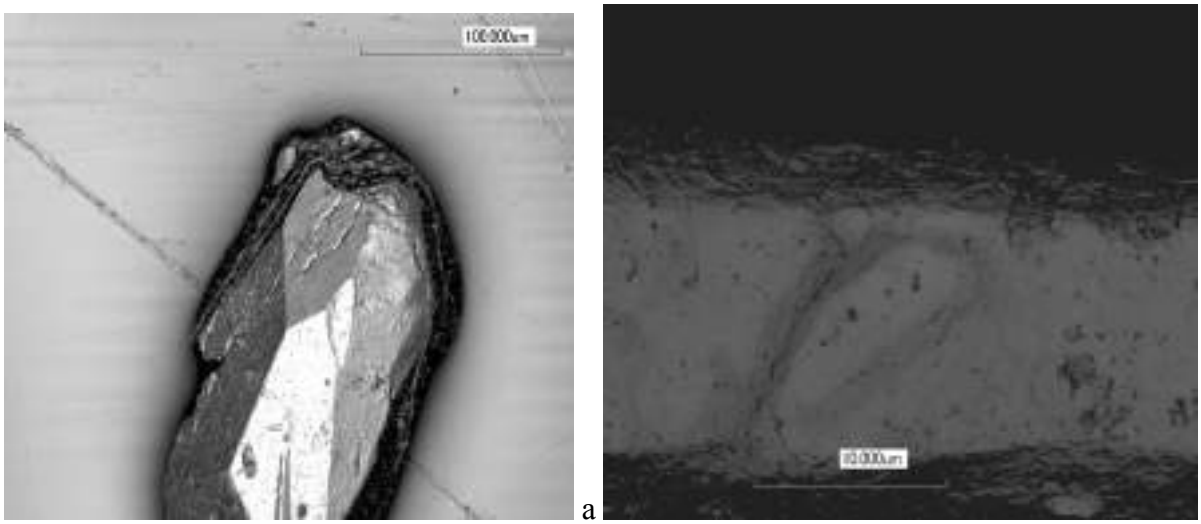



**Рис. 9. Осколок циркона (а) и состояние поверхности зерна (б)**

Циркон в пробе представлен светло-бурыми, желтоватыми, светло-розовыми, бесцветными, прозрачными и полупрозрачными по окраске зернами. Поверхность зерен блестящая, гладкая, реже неровная, шероховатая, с наростами, изломами, примазками. Кристаллы удлиненные, дипирамидально-призматические цирконового и гиацинтового типов со степенью идиоморфизма от высокой до средней со сглаженными ребрами и вершинами. Размер таких зерен 0,2–0,3 × 0,05–0,1 мм с $К_у$ = 2–3. Встречаются включения, микровключения и трещиноватость по зерну. Часто наблюдается зональность, иногда прерывистая, нечеткая. Порой видна тонкая кайма обрастания. Описанные факторы (микровключения, микротрещиноватость, обрастание, вростки, рис. 4–9) способствуют разупрочнению зерен (образование ослабленных зон по кристаллу) циркона и последующему их разрушению в процессах дробления и измельчения.

Среди циркона встречаются обломки со следами граней, почти округлые и бесформенные, с размером зерен 0,2 × 0,1 мм и 0,05 × 0,05 мм с $К_у$ = 1,0–1,5. По границам разлома наблюдаются примазки, пленки и присыпки, сростки с минералами породы (рис. 5) указывают на первичность их присутствия в породе, что существенно для определения возраста породы, и, соответственно, извлечения информации о процессах минералообразования пород. В этой связи приводится определение обломков в нашем понимании.

**Обломки – это зерна с реликтами граней или без них, на границе разлома которых фиксируются примазки, пленки, присыпки, срастание с минералами породы, отпечатки**

**ассоциирующих с цирконом минералов, граница разлома оплавленная, скругленная, смятая.**

Наибольшее содержание таких обломков в измельченной породе кислых вулканитов (рис. 3, табл. 1) во фракциях 0,1 и 0,071 мм. Их присутствие в дробленой породе свидетельствует об эффективности раскрытия в процессе рудоподготовки.

Осколки циркона (табл.1, рис. 6, 8, 9) встречаются во всех фракциях измельченной породы. Среди них зерна с реликтами граней и без граней, бесформенные, остроугольные, изометричные, сколы – продукты разрушения кристаллов циркона, образовавшиеся в процессах дроблении и измельчения. Размеры зерен от 0,2 × 0,1 мм до 0,05 × 0,05 мм. Количество таких зерен циркона возрастает от крупных фракций к мелким (табл. 1) и наибольшее количество их во фракции – 0,05 мм.

**Осколки – это зерна циркона с раковистым, полураковистым изломом, остроугольными окончаниями без примазок, пленок, присыпок, отпечатков и сростков.**

Сравнительный анализ (табл. 1 и рис. 2) показывает, что в шламовой фракции – 0,05 мм содержание циркона резко падает в сравнении с основными фракциями, выбранными для технологии получения циркона. Существующее положение, состоящее, с одной стороны, в необходимости максимального раскрытия циркона, с другой стороны, минимального перехода в шламы полезного минерала, определяет эффективность процессов дробления, измельчения и обогащения пород и руд [4].

Таким образом, в работе показано, что разрушение кристаллов циркона и соответственно образование шламов происходит неизбежно в процессах дробления, измельчения не только из-за низкой избирательности рудоподготовительных процессов, но и наличия ослабленных зон и разупрочнения кристаллов циркона в породе в результате вторичных процессов (метаморфизм, метасоматоз, гипергенез и др.).

И вместе с тем типоморфные свойства, к которым возможно отнести высокую твердость, отсутствие спайности, особенности морфологии и ослабленные границы срастания циркона с породообразующими минералами, способствуют раскрытию и сохранению кристаллов и обломков циркона, которые синхронны с возрастом образованием пород и являются носителями информации о генезисе пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кевлич В.И. О некоторых минералогенетических особенностях циркона, оказывающих влияние на разработку схем обогащения и выделения мономинеральных фракций // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, вып.3, 2000. С. 89–93.
2. Кевлич В.И., Трофимов Н.Н., Кукушкина П.И. Опыт извлечения цирконов на радиологический возраст из расслоенных и дифференцированных интрузивов // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения северо-запада России: Материалы Всероссийской конференции. Петрозаводск, 2007. С. 159–162.
3. Кевлич В.И. К методике выделения циркона из минерала хозяина для использования в геохронологии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: ИГ КарНЦ РАН, вып. 3, 2001. С. 89–94.
4. Ревнивцев В.И., Гапонов Г.В., Зарогатский Л.П. и др. Селективное разрушение минералов. М.: Недра, 1988. 286 с.

## MEMORY

## АКАДЕМИК НИКОЛАЙ ПАВЛОВИЧ ЮШКИН

Утром 18 сентября 2012 года раздался звонок по телефону из Сыктывкара. Игорь Бурцев сообщил мне печальную новость о кончине 17 сентября вечером Николая Павловича Юшкина. Идя на работу, я с грустью и тяжестью вспоминал о нем. Впервые я узнал о Н.Юшкине из газеты «Правда» (номер 1967 г.), где была помещена статья под названием «В чьи паруса дует ветер». В этой статье говорилось о той истории, как кандидатская диссертация молодого исследователя Н.Юшкина стала докторской по рекомендации диссертационного совета Ленинградского горного института. За него голосовали знаменитый кристаллограф И.И.Шафрановский, великий минералог Д.П.Григорьев и другие известные геологи. Младший научный сотрудник Института геологии Коми филиала АН СССР защитил на Ученом совете Ленинградского горного института кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях». Произошел исключительный случай, когда за эту же работу присуждается ученая степень доктора геолого-минералогических наук молодому ученому в возрасте 31 года. Это настоящая сенсация.

Несколько вводных слов о предшествующем периоде. Николай Павлович Юшкин родился 20 мая 1936 года в деревне Ивангора Овинищенского района Калининской области. О своих ранних годах Николай Павлович рассказал в написанной им самим замечательной книге «Начало пути» (Юшкин Н.П. Начало пути. - Екатеринбург: УрО РАН.1996. – 172 с.). Это воспоминание – песня о детстве, школьных студенческих годах. Важные даты жизни и научной деятельности: 1952 год – окончил 8 классов Кесемской средней школы, 1952-1955 гг. – студент геологоразведочного отделения Кировского горно-химического техникума (Мурманская область), 1956-1961 гг. - работал в тресте Средазгеохимразведка» и экспедиции «Химгеолнеруд» Узглавкгеология (Ташкент) на должностях от коллектора до старшего техник-геолога, 1959-1965 гг. – студент Всесоюзного заочного политехнического института (с 1960 г. заочного отделения геологоразведочного факультета Ташкентского политехнического института). К концу учебы Юшкин был автором 41 опубликованной работы, с 1961 г. работает в Институте геологии КомиНЦ УрО РАН (Институт геологии Коми филиала АН СССР), поднимаясь стремительно по иерархической лестнице от старшего лаборанта до директора института (с 1985 по 2008 гг.), затем советник РАН. Так было: 1968 г. – премия Ленинского комсомола за книгу «Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях», 1971 год – в институте организована лаборатория генетической и экспериментальной минералогии, заведующим избирается по конкурсу 35-летний Николай Юшкин– , в этот же год награжден орденом Трудового Красного Знамени, 1974 г. – присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки Коми АССР», 1977 год – опубликована фундаментальная монография Н.П.Юшкина «Теория и методы минералогии. Избранные проблемы». 1978- 1992 гг. – Президент Малой академии старшеклассников г.Сыктывкара, 1981 год – присвоено ученое звание профессора по специальности «Минералогия», 1982 год – присуждена

премия Совета министров СССР за работу «Исследование и использование новых материалов», 1986 год – присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки РСФСР», 1987 год – избран чл.-корр. АН СССР, 1991 год избран действительным членом РАН, 1996 год – присуждена премия академика А.Е.Ферсмана за цикл работ «Топоминералогия геологических провинций и рудоносных регионов», награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени. 1998 год – Демидовская премия, 2001 год – премия Республики Коми в области науки, 2003 год – присуждена Уральская горная премия, 2006 год – премия Триумф. 21 декабря 2006 года – Москва, Кремль, Екатерининский зал – Президент Российской Федерации В.В. Путин вручает ему орден «За заслуги перед Отечеством III степени». 2007 год – Золотой диплом лидера науки Европы.

**На конференции в г.Архангельске, 2004. Слева направо: академик Н.П.Юшкин, Н.В.Шаров, В.В.Щипцов, академик В.А.Коротеев, чл.-корр. Е.П.Романов**

Я счастлив, что был знаком с Юшкиным. Мы познакомились там, где пегматиты – кладовые минералов, в Чупе. А далее случай привел к тому, что мы стали встречаться ежегодно на различных конференциях, собраниях ОНЗ РРАН и общих собраниях РАН. В июне 2005 г. обедая с ним в ресторане «Петровский» в Петрозаводске вспоминаю я сказал, что считаю за честь и гордость сидеть за столом напротив великого минералога. На это он ответил просто, что он также рад в свою очередь такому случаю и возможности побеседовать со мной.

Научное творчество Н.П.Юшкина безгранично – от естественных и философских до узкоспециальных научных направлений, среди которых определяющим является теория и методы минералогии. Несомненно, он принадлежит к лидерам отечественной и мировой минералогии,

признанный выдающийся ученый-геолог. Николай Павлович создает в Сыктывкаре мировой по значимости центр минералогии, объединяя специалистов различного профиля и увлекая их в неповторимый мир сомнений, решений и открытий в геологии и минералогии. Ученики Юшкина назвали его именем минерал – юшкинит ($V_{1-x}Sn[(Mg, Al)(OH)]_2$, открытый на Пай-Хое (Полярный Урал).

**Заключительный итоговый день работы семинара по технологической минералогии в местечке Шишкин лес под Сыктывкаром, октябрь 2010 г. Рядом с Николаем Павловичем его дочь Галина Николаевна Лысюк**

Взгляд Николая Павловича на мир наноструктур и наноиндивидов стал толчком к развитию современной минералогии («минералогическая интервенция в микромир») от минералогии к наноминералогии. Под руководством академика Юшкина создан Центр микро- и наноминералогических исследований, где изучается микро- и нанодисперсное состояния минерального вещества, строение и свойства наночастиц Он решительно поддерживает и развивает новое направление в минералогической науке – витаминералогия, минералогия жизни.

Как председатель Комиссии по технологической минералогии РМО всегда буду помнить активную помощь, которую оказал Николай Павлович в организации и проведении 5-го Российского семинара по технологической минералогии в Сыктывкаре (октябрь 2010 г.).

Много и многое можно вспоминать. Не стало талантливого ученого, солдата науки по словам Д.В.Рундквиста и А.М.Асхабова. Утрата тяжелая и невосполнимая. Еще совсем недавно в выпуске сборника по материалам V Российского семинара по технологической минералогии, который прошел на базе Института геологии КомиНЦ УрО РАН, в рубрике «Наши юбиляры» был размешен материал к 75-летию академика Николая Павловича Юшкина (Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С.225-227). В этой статье, в частности, отмечалось: «…юбилей неслучайно совпадает с 40-летием Сыктывкарской минералогической школы, ставшей одной из

ведущих центров мира по исследованию минералов в их естественной среде, процессов и эволюции минералообразования» и заключалось «Комиссия по технологичексой минералогии сердечно поздравляет дорогого Николая Павловича с Юбилеем. Наши пожелания ему быть здоровым: новых творческих достижений, новых открытий!..». Интересно, что в начале статьи была техническая опечатка, а именно: было указано «Николай Павлович Юшкин родился 20 мая 1036 года». При встрече в Москве Николай Павлович упомянул, что прошло так много лет, а он так хорошо сохранился. Я сказал Юшкину, что так и надо держать себя и в будущем. Увы, судьба распорядилась иначе.

**На природе под Сыктывкаром (конец октября 2010 г.). Слева направо: академик М.А.Федонкин, В. А. Литовченко, чл.-корр.В.Н.Пучков, чл.-корр.В.Н.Анфилогов, академик Н.П.Юшкин, И.В.Козырева, О.Б.Котова, В.В.Щипцов**

В моем сердце, как и во многих сердцах, останется добрая вечная память, которая будет нас возвращать вновь и вновь к его публицистике, воспоминаниям о нем... Его научные труды – это золотой фонд геологической литературы.

*Председатель Комиссии по технологической минералогии РМО В.Щипцов*

# НАШИ ЮБЛЯРЫ

## ПИРОГОВ БОРИС ИВАНОВИЧ

В летнюю пору 2012 г. исполнилось 80 лет со дня рождения и 55 лет производственной, научной, педагогической и общественной деятельности профессору, докт. геол.-мин.наук Пирогову Борису Ивановичу.

После окончания в 1956 г. Криворожского горнорудного института работал на кафедре кристаллографии, минералогии и петрографии, в 1958 г. перешел на работу в Южный ГОК, где в период 1958-1965 гг был на комбинате в должности старшего петрографа (минералога) при главном геологе. В 1965 г. защитил кандидатскую диссертацию и начал работать старшим научным сотрудником, затем руководителем отдела вещественного состава руд и концентратов в Механобрчермете. С 1970 г. в течение 27 лет был заведующим кафедрой минералогии, кристаллографии и месторождений полезных ископаемых Криворожского горного института, 1978 г. - защита докторской диссертации, 1979 г. - присвоение звания профессора. В 1997 г. становится профессором кафедры минералогии и геохимии РГГРУ, а затем переходит в ФГУП «ВИМС», где работает главным научным сотрудником до настоящего периода.

Пирогов Б.И. является крупнейшим специалистом в области технологической минералогии руд черных и цветных металлов. В 1970 г. в Криворожском горнорудном институте активно начала функционировать научная школа Бориса Ивановича Пирогова по технологической минералогии, получившая в 80-ые годы статус украинской школы. Им была составлена первая геолого-технологическая карта Скелеватского месторождения железистых кварцитов Кривого Рога и предложена минералого-технологическая классификация руд крупнейшего в Европе Южного ГОКа.

Под его руководством проведены минералого-технологические исследования железных и марганцевых руд крупнейших месторождений СССР, а также медномолибденовых руд монгольского месторождения Эрдэнэт. Значительный вклад Б.И.Пирогов внес в изучение железистых кварцитов докембрийских железо-кремнистых формаций. Он участвовал в редакции 10-томного издания АН УССР «Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР (стратиграфия, тектоника и др.)», а также в качестве автора и редактора монографии той же серии «Минералогия». Он является автором монографий «Генезис железных руд» (1990) и «Железонакопление в докембрии (1992), «Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов (1969), «Минералогия Криворожского железорудного бассейна» (1977).

Б.И.Пирогов стоял у истоков становления технологической минералогии. Большой вклад внес в разработку методологии технологической минералогии и принципов геолого-технологической оценки руд с учетом закономерностей изменчивости технологических свойств минералов в единой геолого-технологической системе. Особый интерес представляет сегодня его монография «Технологическая минералогия железных руд», в которой рассмотрены проблемы технологической минералогии руд на современном ГОКе.

Многие годы Борис Иванович работает в Комиссии по технологической минералогии ВМО (ныне РМО), членом бюро которой он является со дня образования комиссии в 1983 г. и по настоящее время. Постоянный участник всех российских семинаров по технологической минералогии, которые регулярно проводятся с 2006 года:

Пирогов Б.И. Методология технологической минералогии и природа технологических свойств минералов (Петрозаводск, 2006);

Пирогов Б.И. Технологическая минералогия полезных ископаемых как основа оценки их комплексности (Петрозаводск, 2007);

Пирогов Б.И. Онтогенический анализ полезных ископаемых – основа выявления и оценки технологических свойств минералов (Петрозаводск, 2008);

Пирогов Б.И. Современные проблемы технологической минералогии (Казань, 2009);

Пирогов Б.И. Современные проблемы технологической минералогии на горно-обогатительном комбинате (Сыктывкар, 2010);

Пирогов Б.И. Поведение минералов в единой геолого-техногенной системе (Петрозаводск, 2011);

Пирогов Б.И. История становления и развития технологической минералогии (Москва, 2012).

Все это по полному праву можно отнести к бесценному материалу по научным и методическим основам технологической минералогии.

Особое место в творческой биографии Б.И. Пирогова занимает педагогическая деятельность. Он является авторитетным ученым в области минералогии. Его лекции и практические занятия, которые он проводит постоянно, отличаются высоким уровнем и посещаемостью. Под его научным руководством защитилось более 30 кандидатских и докторских диссертаций. Им опубликовано более 400 научных трудов.

Пирогов Б.И. на протяжении многих лет является членом диссертационного совета ВИМСа. Он член минералогической секции Ученого совета ВИМСа, член бюро Научного совета по минералогическим методам исследования. Пирогов Б.И. является Почетным разведчиком недр РФ, почетным членом Российского и Украинского минералогических обществ, лауреатом премий Совмина СССР и Высшей школы Украины. Он награжден Почетной грамотой Президиума Украины и медалями «Ветеран труда», «За доблестный труд», нагрудными знаками «За отличные успехи в работе» МВССО и «За заслуги и стандартизацию» Комитета стандартов мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

***Комиссия по технологической минералогии передает наилучшие пожелания. Будьте счастливы и здоровы на многие годы!***

## КУЗЬМИН ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ

Владимиру Ивановичу Кузьмину, заслуженному геологу РФ, Почетному члену Российского минералогического общества, действительному члену РАЕН, доктору геолого-минералогических наук, 28 июня 2012 г. исполнилось 80 лет со дня рождения. После окончания в 1955 г. МГУ им. М.В. Ломоносова Владимир Иванович обучается в аспирантуре на кафедре минералогии МГУ.

После завершения обучения следует защита кандидатской диссертации на тему «Геологическое строение и минералогия оловорудного месторождения Горное в Приморье». С декабря 1958 г. работает в ВИМСе – научный сотрудник, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией прикладной минералогии, затем заведующий минералогическим отделом, ведущий научный сотрудник по настоящее время. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Научно-методические основы прикладной минералогии при изучении месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых».

Под непосредственным руководством В.И. Кузьмина разработаны новые методы минералогических исследований, усовершенствована общая методика изучения вещественного состава руд применительно к различным видам минерального сырья, в первую очередь, тонкодисперсных (железомарганцевые океанические образования, бокситы, редкометалльные коры выветривания и др.). В.И. Кузьмин развивает учение о типоморфизме минералов. Выявленные им типоморфные особенности ряда минералов (касситерита, магнетита, турмалина, гранатов и др.) позволили разработать комплекс поисковых минералогических критериев руд. Это эффективно может использоваться при прогнозно-поисковых работах на рудные полезные ископаемые. Он активно занимается историей

минералогии, историей ВИМСа. Более 30 лет являлся заместителем председателя Научного совета по методам минералогических исследований, неоднократно участвовал в аттестации Центральных лабораторий Мингео СССР.

Яркая, плодотворная и целеустремленная жизнь Владимира Ивановича – это пример должного служения отечественной науке и геологии. В.И.Кузьмин внес значительный вклад в разработку научно-методических основ прикладной минералогии при изучении месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. В 2012 году он стал членом Комиссии по технологической минералогии РМО.

Кузьмин В.И. награжден медалями «Ветеран труда», «В память 850-летия Москвы», «За доблестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина», «В ознаменование 100-летия геологической службы СССР», золотым значком XXYII МГК, значком «Отличник разведки недр», золотой, серебряной, бронзовой и Большой медалями ВДНХ, почетной медалью РАЕН им. П.А.Капицы — «Автору научного открытия» и другими государственными и отраслевыми наградами. В 2009 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный геолог РФ».

***Комиссия по технологической минералогии РМО желает Владимиру Ивановичу многолетия и новых научных достижений!***

Наиболее важные публикации

Кузьмин В.И. Методы поисков месторождений борного сырья / В кн. «Бор, методы изучения месторождений бора». Сб. научн. трудов. — М.: ВИМС, 1960. С. 24–27.

Кузьмин В.И. Особенности соотношения бора с некоторыми другими элементами в скарновых месторождениях / В кн. «Мат. по геол. и методам изучения мин. сырья».-М.: ВИМС, 1962. Вып. 43. С. 110–119.

Кузьмин В.И. Особенности геологического строения и минералогии оловорудного месторождения Горное в Приморье // М.: ВИМС. Минеральное сырье. 1966. № 11. С. 30–50

Кузьмин В.И., Конев А.С. Геохимические особенности турмалинизации в пределах рудных полей месторождений олова касситерит-силикатной формации / В кн.: «Геохимические методы при поисках месторождений олова, вольфрама и ртути». - Владивосток, 1973. С. 117–118.

Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А., Бернштейн П.С., Розова Е.В. Новые методы и аппаратура для минералогического исследования минерального сырья / В кн. Мат. Всесоюзн. совещания - Школы передового опыта в г. Хабаровске. -М.: ВИМС, 1973. С. 26–31.

Кузьмин В.И. Современные методы минералогического изучения руд сложного состава. Обзор. Сер. X. «Лабораторные и технологические исследования и методы обогащения минерального сырья» - М.: ВИЭМС, 1974. 42 с

Кузьмин В.И., Добровольская Н.В., Солнцева Л.С. Турмалин и его использование при поисково-оценочных работах / М.: Недра, 1979. 269 с.

Гинзбург А.И., Кузьмин В.И., Сидоренко Г.А. Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ / М.: Недра, 1981. 237 с.

Мейснер Л.Б., Кузьмин В.И. Новый радиометрический способ сепарации кварц-полевошпатового сырья // Обогащение руд. 1983. № 4. С. 18–19.

Кузьмин В.И., Мамина А.В. Подготовка проб к минералогическому исследованию / В кн. «Методы минералогических исследований. Справочник».-М.: Недра, 1985. С. 15–25.

Кузьмин В.И. Турмалинсодержащие парагенезисы - индикаторы формационной принадлежности гидротермальных месторождений / В кн.: Crystal Chemistry of Minerals - «Кристаллохимия минералов». Мат. XIII Конгресса Международной Минералогической Ассоц. — Изд. АН Болгарии. София, 1986. С. 359–36

Еремеев А.Н., Кузьмин В.И. Идеи В.И. Вернадского в работах ВИМСа // Советская геология. 1988. № 6. С. 3–10.

Кузьмин В.И. Группа турмалина / В кн. «Типоморфизм минералов». М.: Недра, 1989. С. 461-474.

Кузьмин В.И. Байесовский подход при оценке истинности суждений в поисковой минералогии // Отечественная геология. 1993. № 5. С. 78-84.

Бушев А.Г., Кузьмин В.И., Пеньков В.Ф., Новгородова М.И., Булаева Е.Ю., Лобзин Е.В. Органические соединения в минералах пегматитов Памира // Геохимия. 1997. № 3. С. 348-352.

Машковцев Г.А., Еремеев А.Н., Кузьмин В.И., Остроумов Г.В. Учные ВИМСа – городу Москве // Разведка и охрана недр. 1997. № 8-9. С. 3-10.

Бушев А.Г., Коплус А.В., Кузьмин В.И. Полициклические ароматческие углеводороды в гранитных пегматитах // Геохимия. 2000. № 11. С. 1232-1239.

Кузьмин В.И., Рогожин А.А., Сидоренко Г.А. Современные методы минералогических исследований при решении геологоразведочных задач // Разведка и охрана недр. 2000. № 11. С. 35-39.

Ожогина Е.Г., Кузьмин В.И., Шувалова Ю.Н. Комплексирование минералогических исследований при обогащении карбонатных марганцевых руд // БЭТИ. Черная металлургия. 2001. Вып. 3. С. 16-25

Кузьмин В.И., Ожогина Е.Г. Прикладная минералогия в решении задач расширения и качественного совершенствования минерально-сырьевой базы Российской Федерации // Разведка и охрана недр. 2002. № 11. С. 8-11.

Колбанцев Р.Л., Куприянова И.И., Скоробогатова Н.В., Кузьмин В.И. Совершенствование нормативно-методической базы формирования и использования музейных коллекций каменного материала // Разведка и охрна недр. 2005. № 4. С. 54-58.

Кузьмин В.И. Совершенствование прогнозно-поисковых и оценоных работ на основе применения современных минералогических методов и критериев // Разведка и охрана недр. 2009. № 6. С. 46-51.

Файнштейн Г.Г., Кузьмин В.И., Комарницкий С.И., Корепанов В.Б. Минералого-технологическая оценка качества скарново-магнетитовых руд рудопроявления М – 4 в Приполярном Урале // Разведка и охрана недр. 2009. № 4. С. 71-76

## АННОТАЦИИ

УДК 549:622.7

**ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПИРОГОВ Б.И. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 7–37, ИЛ. 4, БИБЛИОГР. 54 НАЗВ.**

Рассмотрены шесть основных временных этапов становления и развития технологbческой минералогии, роль русских и зарубежных ученых, системность комплекса минералого-технологических методов исследования по оценке технологических свойств минералов и полезных ископаемых в целом на макро-, микро-, нано-уровнях.

Six main temporal stages in the development of technological mineralogy, the contribution of Russian and foreign scientists and a system of mineralogical and technological methods for evaluation of the technological properties of minerals and useful minerals in general at macro-, micro- and nano-levels are discussed.

УДК 553.6

**РОЛЬ И МЕСТО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ В ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ XXI ВЕКА. ЩИПЦОВ В.В. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 37–46, ТАБЛ. 2, ИЛ. 1, БИБЛИОГР. 24 НАЗВ.**

Новая сырьевая глобальная стратегия XXI века предполагает повышение эффективности использования сырьевых материалов, создание высоких технологий. Особое внимание уделяется вопросу критических металлов и промышленных минералов. Четыре сектора промышленности прямым образом связаны с критическими металлами и промышленными минералами: автомобилестроение, авиакосмическая промышленность, электроника, энергетика. В производство вовлекаются нетрадиционные и новые виды минерального сырья, включая бурный рост потребностей рынка в РЗЭ. В связи с этим и другими обстоятельствами необходимо иметь полную и достоверную информацию о составе, строении и технологических свойствах рудоносных объектов. Технологии рециклинга заняли в некоторых развитых странах важное место в качестве источника сырья, из которого можно извлечь металл. Использование аппаратуры высокого уровня позволяет выявлять причины нетехнологичности сырья и предлагать новые подходы для совершенствования оценок.

A new global 21$^{st}$-century strategy has been proposed to make the use of raw materials more efficient and to develop high technologies. Special attention is given to critical metals and industrial minerals. Four industries, such as motor-car industry, air-space industry, electronics and power engineering, are directly related to critical metals and industrial minerals. Non-conventional and new types of mineral products, including REE which are in great demand on the market, are used for industrial purposes. Therefore, complete reliable information on the composition, structure and industrial properties of ore-bearing localities is needed. Recycling technologies are widely used in some countries as a source of raw material from which metal can be recovered. Up-to-date equipment is used to determine why the raw material evaluated is not technological and to make evaluation more reliable

УДК 549.08:622

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ОЖОГИНА Е.Г., РОГОЖИН А.А. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 46–19, ИЛ. 1.**

Оценка качества полезных ископаемых минералогическими методами позволяет с минимальными затратами получить данные об исходном сырье, его технологических свойствах, прогнозировать технологию переработки и качество ожидаемых продуктов. Требования к изучению вещественного состава руд и пород: применение комплекса методов исследования, системный подход к результатам анализов и метрологическое обеспечение всех видов минералогических работ. Рассмотрена прогнозная оценка качества окисленных железо-марганцевых руд Полярного Урала.

Mineral resources are evaluated qualitatively by mineralogical methods to obtain data on initial raw materials and their technological properties and to predict possible processing technology and the quality of the products expected at minimum cost. To study the mineralogical composition of ores and rocks, a set of research methods, a systems approach to analytical results and metrological standardization of all types of mineralogical analysis are required. The forecast qualitative evaluation of oxidized ferromanganese ores from the Polar Urals is discussed.

УДК 549.08:548

**ФИЗИКА ПОВЕРХНОСТИ МИНЕРАЛОВ КАК МЕТОД ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ. КОТОВА О.Б. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 49–53, БИБЛИОГР. 16 НАЗВ.**

Показано, что с вовлечением в переработку тонкодисперсного минерального сырья физику поверхности минералов можно рассматривать как метод прогнозной оценки их технологических свойств. Отмечена роль физики поверхности минералов в технологиях переработки, извлечения полезных компонентов полезных ископаемых, модифицировании свойств и структуры (включая наноструктурирование) для создания материалов с новыми свойствами.

It has been shown that the involvement of mineral surface physics in processing of fine-grained mineral products can be considered as a method for forecast evaluation of their technological properties. The role of mineral surface physics in processing technologies, extracting useful components of minerals and modifying their properties and structure (including nanostructuring) for creating materials with new properties is discussed.

УДК 553.32:622.79+549+622.7.017

**ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ВЫБОР ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПО ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ ТРУДНООБОГАТИМЫХ МАРГАНЦЕВЫХ РУД. СОКОЛОВА В.Н. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 53–61, ТАБЛ. 4, ИЛ. 1, БИБЛИОГР. 6 НАЗВ.**

На основании комплекса экспериментальных исследований определены минералого-технологические характеристики, позволяющие обосновать выбор инновационных решений по химической переработке труднообогатимых марганцевых руд, позволяющих получать высококачественную товарную продукцию, конкурентоспособную на мировом рынке.

Mineralogical and technological characteristics were assessed to select innovative solutions for chemical processing of hardly dressable manganese ores, used to manufacture high-quality commercial products competitive in the world market, were identified on the basis of experimental studies.

УДК 550.812.012:[553.068.5:553.493.531'494]

**ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ РОССЫПНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНО-ТИТАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ. ЛЕВЧЕНКО Е.Н. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 61–77, ТАБЛ. 15, ИЛ. 3, БИБЛИОГР. 7 НАЗВ.**

Проведен анализ особенностей вещественного состава перспективных для освоения титан-циркониевых россыпей России. Выявлены минералого-технологические факторы, влияющие на технологические показатели переработки титан-циркониевых россыпей. Предложены критерии прогноза технологических свойств титан-циркониевых россыпей на ранних стадиях геологоразведочных работ. Представлены результаты апробации разработанных критериев при оценке технологических свойств Ti-Zr песков на пробах различных прогнозно-поисковых площадей Западно-Сибирской платформы.

The characteristics of the mineralogical composition of Russia’s promising titanium-zirconium placers were analyzed. The mineralogical and technological factors which affect the technological parameters of processing titanium-zirconium placers were revealed. Criteria for prediction of the technological properties of titanium-zirconium placers in the early stages of exploration are proposed. The results of the testing of the evaluation criteria developed by assessing the technological properties of Ti-Zr sands using samples from some forecasting-prospecting areas of the West Siberian Platform are reported.

УДК 662.7+553.41

**ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО БЛАГОРОДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ. ЧЕРЕПАНОВ А.А., АЛЕКСАНДРОВА Т.Н., БЕРДНИКОВ Н.В. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 80–87, ТАБЛ. 2, ИЛ. 3, БИБЛИОГР. 6 НАЗВ.**

Приведены результаты аналитических и минералого-технологических исследований, подтверждающих наличие в углеродистых сланцах сутырской и кимканской толщ Буреинского массива МПГ и золота в виде включений и микровключений сложного состава. Извлечение благородных металлов при технологических испытаниях неполное, но позволяет оценивать углеродистые сланцы как бедные руды с промышленным золотым оруденение с попутной платиноидной минерализацией.

The results of analytical and mineralogical-technological studies, which support the presence of compositionally complex gold and PGE inclusions and micro-inclusions in carbonaceous shales from Sutyr and Kimkan units (Bureya massif), are discussed. Although the extraction of precious metals from shales by technologies used is incomplete, the high-carbon shales are classified as low-grade ore with industrial gold concentration and associated PGE mineralization.

УДК 549.905:553.412

**ПРИРОДНЫЕ ТИПЫ РУД НА СЕРЕБРЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КИМПИЧЕ (ВЕРХОЯНЬЕ) И ПРОГНОЗ ИХ ОБОГАТИМОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА. ОСТАПЕНКО Л.А. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ**

**ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 87–101, ТАБЛ. 5 , ИЛ. 6, БИБЛИОГР. 9 НАЗВ.**

Определены критерии выделения двух природных типов руд (первичных и окисленных) на месторождении Кимпиче. Установлены параметры вещественного состава, оказывающие наиболее существенное влияние на технологические свойства руд. По данным изучения вещественного состава сделан прогноз извлечения полезных компонентов из руд различных природных типов.

Classification criteria for two natural ore types (primary and oxidized) at Kimpiche Ag deposit have been developed. Mineralogical and geochemical characteristics as key controls of ore flotability are defined, and relevant predictions of the technologic properties of various ore types are presented.

УДК 553.251:552.323.6

**О ВЛИЯНИИ ВТОРИЧНЫХ МИНЕРАЛОВ КИМБЕРЛИТОВ НА ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА. ЗИНЧУК Н.Н. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 101–112, БИБЛИОГР. 16 НАЗВ.**

Приведены результаты комплексного исследования минералов-новообразований кимберлитов Сибирской платформы, полученные как в плане, так и на разведанную глубину некоторых диатрем. Показано, что в отдельных трубках в роли породообразующих минералов кимберлитов присутствуют ряд нетрадиционных вторичных минералов (пироаурит, амакинит, брусит, галит и др.), повышенное содержание которых может оказывать существенное влияние на технологический процесс. От их количества может зависеть вязкость кимберлитов, выход шламов, влияющих на селективность и режимы работы пенной сепарации и других технологических процессов. Ряд вторичных минералов, обладающих адсорбционными свойствами (монтмориллонит, сапонит, различные смешаннослойные минералы, изменённые слюды и др.) способен в различной степени накапливать влагу в отдельных блоках кимберлитов и тем самым воздействовать на обогатимость пород. Требуют отдельного изучения для каждой диатремы плёнки на кристаллах алмазов, имеющие переменный состав новообразований и затрудняющих обычно их извлечение рентгенолюминесцентными методами. При совершенствовании методов обогащения и извлечения из пород алмаза важно знать в перспективе с какими рудами можно сталкиваться как в плане трубок, так и на разведанную их глубину, для чего предлагается минералогическое картирование отдельных опорных горизонтов по ходу разработки месторождений.

The results of the integrated study of newly-formed kimberlite minerals from the Siberian Platform, obtained both in plan view and for the prospected depth of some diatremes, are reported. It is shown that some non-conventional secondary minerals, such as pyroaurite, amakinite, brusite, halite, etc., whose elevated concentration can considerably affect an industrial process, are present as rock-forming kimberlite minerals in some pipes. Kimberlite viscosity and slurry yield, which influence the selectivity and operation modes of froth separation and other industrial processes, depend on their quantities. Some secondary minerals that display adsorptive properties, such as montmorillonite, saponite, various mixed-layered minerals, altered clays, etc., can accumulate moisture in some kimberlite blocks, thereby affecting the concentrating capacity of ores. Films on diamond crystals, which exhibit the variable composition of newly-formed minerals and make it hard to recover them by X-ray luminescence methods, should be examined separately for each diatreme. When improving methods for dressing and recovering diamonds from rocks, it is essential to know what ore types are likely to be encountered in pipes and at prospecting depth. Mineralogical mapping of individual key horizons during the mining of deposits is proposed for this purpose.

УДК 553.32:622.79+549

**ФТОРАММОНИЙНЫЙ СПОСОБ ОБЕСКРЕМНИВАНИЯ ЛЕЙКОКСЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА ЯРЕГСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ. ИГНАТЬЕВ Г.В., ПЕРОВСКИЙ И.А. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 112–119, ТАБЛ. 2, ИЛ. 5, БИБЛИОГР. 4 НАЗВ.**

Получен высококачественных титановый концентрат, пригодный для переработки по хлоридному способу. Исследован состав, структура и свойства полученного концентрата. Показана возможность создания нового высокоэффективного способа лейкоксена Ярегского месторождения, характеризующегося простотой аппаратурного оформления, низкими энергозатратами, замкнутым циклом циркуляции основного реагента.

High-quality titanium concentrate, suitable for recycling by the chloride method, has been produced. The composition, structure and properties of the concentrate produced have been studied. It is shown that a new highly efficient method of leucoxene from the Yarega deposit, based on simple equipment, low power consumption and a closed circulation cycle of the main reagent, can be developed

УДК 549.6:549.1+549.08

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КВАРЦА ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ). ДАНИЛЕВСКАЯ Л.А., СКАМНИЦКАЯ Л.С., БУБНОВА Т.П. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 119–125, ТАБЛ. 1 ИЛ. 6, БИБЛИОГР. 2 НАЗВ.**

Перспективным объектом нетрадиционного кварцевого сырья на территории Карело-Кольского региона, является жильный кварц золоторудного месторождения Майское. Особенностью кварца является высокий индекс кристалличности. Предварительные технологические исследования показали, что кварц является перспективным для получения ВЧК.

Veined quartz from Maiskoe gold deposit is shown to be a promising source of non-conventional raw material. The quartz has a high crystallinity index. Preliminary technological studies have shown that this quartz is promising for high-purity quartz production.

УДК 553.69

**ОРГАНОГЛИНЫ. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ. НАСЕДКИН В.В., ДЕМИДЕНОК К.В., БОЕВА Н.М., ЛЫГАЧ В.Н., ВАСИЛЬЕВ А.Л., БЕЛОУСОВ П.Е., ПОКРОВСКАЯ Е.В., ГАРБУЗОВА И.А., МЕРЕНКОВ А.М. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 125–149, ИЛ. 18, БИБЛИОГР. 5 НАЗВ.**

Рост потребления бентонитовой глины отчетливо набирает темп в производстве пластмасс, различного рода упаковочных материалов, строительных конструкций и т.д. Причиной тому, стали многочисленные исследования минералогии, кристаллохимии и физико-химических свойств глин, показавшие, что главный минерал бентонитов – монтмориллонит, относящийся к классу природных наночастиц, может служить своеобразным буфером между органической полимерной средой пластмасс и неорганической силикатной массой. Происходит этот процесс под воздействием на глину поверхностно активных веществ, представленных в основном алкиламмониевыми соединениями. В результате образуется новая разновидность глины – органоглина. Добавка органоглины в полимерную массу позволяет повысить термостойкость, газонепроницаемость, водоотталкивающие свойства, и придать высокую механическую прочность некоторым видам пластмасс. В данной статье авторами детально рассмотрены как теоретические, так и практические стороны данного вопроса.

The consumption of bentonite clay in the production of plastic, different packing materials, construction designs, etc. is steadily increasing. Numerous studies of the mineralogy, crystal chemistry and physical-chemical properties of clays have shown that montmorillonite, the main mineral of bentonites, which belongs to a class of natural nanoparticles, can serve as a buffer between an organic polymer and inorganic silicate mass. In this process, clay is influenced by surface-active substances represented chiefly by alkyl ammonia compounds. As a result, a new type of clay – organic clay is formed. Addition of organic clay to polymer mass increases thermal stability, gas tightness and water-repellent properties, and imparts high mechanical strength to some types of plastics. In this paper, the authors discuss in detail both the theoretical and practical aspects of the problem.

УДК 549.08:622

**ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ РЕГИОНАЛЬНОГО И КОНТАКТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАРГАНЦЕВЫХ РУД. МАРТЫНОВА Т.А. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 140–146 , ТАБЛ. 2 ИЛ. 1, БИБЛИОГР. 2 НАЗВ.**

Сопоставление смешанных (силикатных и карбонатно-силикатных) разновидностей марганцевых руд, локализованных в вулканогенно-осадочных проявлениях разных металлогенических зон, даёт возможность оценить влияние геологической обстановки на особенности вещественного состава, строения и технологические свойства руд.

Comparison of mixed (silicate and carbon-bearing-silicate) manganese ores located in the volcanic-sedimentary occurrences of different metallogenic zones makes it possible to assess the effect of geological setting on the mineral composition, structure and technological properties of ores.

УДК 549.731.13:622.3(571.51)

**МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ. ЖУКОВА В.Е., ЦЕЛЮК Д.И. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 146–150 , ИЛ. 7.**

В статье рассмотрены минеральный и гранулометрический состав лежалых хвостов горнорудного производства Красноярского края, степень раскрытия рудных минералов, а также охарактеризованы основные особенности магнетита. Дана оценка возможности принятия технологических решений по использованию лежалых хвостов хвостохранилища ОАО «Краснокаменское рудоуправление».

The mineral composition, grain size distribution and mineral liberation of iron ore concentration tailings of the Krasnokamensk Mine Management, Krasnoyarsk Region, are discussed. The main characteristics of magnetite features are described. The technology proposed for the use of tailings from the Krasnokamensk Mine Management JSC is assessed.

УДК 549.6:549.1+549.08

**ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ КВАРЦЕВЫХ ПОРФИРОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ РОЗА-ЛАМПИ (КАРЕЛИЯ) КАК ИСТОЧНИКА ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ. СКАМНИЦКАЯ Л.С., БУБНОВА Т.П. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 150–157, ТАБЛ. 4, ИЛ. 7, БИБЛИОГР. 4 НАЗВ.**

Одним из источников высококалиевого сырья в России могут стать кварцевые порфиры месторождения Роза-Лампи. Для технологических исследований опробование выполнено по двум магистральным разведочным канавам и горным выработкам. Установлено обогащение микроклина

барием и повсеместное присутствие включений циркона. Анализ вещественного состава показывает преимущества кислых вулканогенных пород перед традиционными пегматитами.

Quartz porphyry from the Roza-Lampi deposit can become a source of high-potassium raw material in Russia. Sampling for technological study has been done along two main prospecting trenches and workings. Barium enrichment of microcline and the ubiquitous presence of zircon inclusions have been revealed. Analysis of mineralogical composition has shown the advantage of felsic volcanic rocks over conventional pegmatites.

УДК 666.3:666.368:622,354.3

**ОЦЕНКА МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРЕМОЛИТ-АКТИНОЛИТОВЫХ ПОРОД КАРЕЛИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КЕРАМИКИ. ПОПОВА Т.В., ИЛЬИНА В.П., КЛИМОВСКАЯ Е.Е., ФРОЛОВ П.В., ИНИНА И.С. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 154–160, ТАБЛ. 4, ИЛ. 4, БИБЛИОГР. 6 НАЗВ.**

К нетрадиционным видам магнезиального сырья для строительной керамики относятся тремолитсодержащие породы. Выделено несколько объектов тремолитсодержащих пород в Карелии. Состав проб, выбранных для технологических испытаний, отличался по содержанию магния, кальция и кремнезема. По данным РФА и микрозондового анализа основной кристаллической фазой, образовавшейся при разложении тремолита и актинолита, является высококальциевый клинопироксен с повышенным содержанием оксида кремния. Сделан вывод, что использование тремолит- и актинолитсодержащих отходов от добычи блочного камня для получения строительной керамики может способствовать решению проблемы их утилизации.

Tremolite-bearing rocks are a non-conventional type of Mg-rich raw material for construction ceramics. Several sources of tremolite-bearing in Karelia have been located. The samples selected for technological tests differ in magnesium, calcium and silica content. X-ray fluorescence and microprobe analyses have shown that high-calcium clinopyroxene with an elevated silicon oxide concentration is the main crystalline phase formed upon tremolite and actinolite decomposition. The conclusion has been drawn that the use of tremolite- and actinolite-bearing waste from dimension stone production for the production of construction ceramics can help solve their utilization problem.

УДК 622. 017.2:549.514.81

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЦИРКОНА В ПРОЦЕССАХ ДРОБЛЕНИЯ И ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД. КЕВЛИЧ В.И., КУКУШКИНА П.И., ТРИФОНОВА А.В. // ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ. ПЕТРОЗАВОДСК: КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН. 2013. С. 163–168, ТАБЛ. 1, ИЛ. 9, БИБЛИОГР. 4 НАЗВ.**

Показано, что разрушение кристаллов циркона в процессах дробления, измельчения происходит не только из-за низкой избирательности рудоподготовительных процессов и физико-механических свойств, но и наличия ослабленных зон и разупрочнения кристаллов циркона в породе в результате процессов метаморфизма, метасоматоза, гипергенеза и др.

It is shown that zircon crystals are destroyed upon crushing and grinding not only because of the low selectivity of ore dressing and physico-mechanical properties but also because of the presence of slackened zones and the destabilization of zircon crystals in the rock as a result of metamorphism, metasomatism, hypergenesis and other processes.

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ …….. 5

***Пирогов Б.И.*** История становления и развития технологической минералогии …… 7

***Щипцов В.В.*** Роль и место технологической минералогии в высоких технологиях XXI века……. 37

***Ожогина Е.Г., Рогожин А.А.*** Прогнозная оценка качества минерального сырья методами прикладной минералогии …….. 46

***Котова О.Б.*** Физика поверхности минералов как метод прогнозной оценки их технологических свойств ……. 49

***Соколова В.Н.*** Влияние минералого-технологических особенностей на выбор инновационных решений по химической переработке труднообогатимых марганцевых руд ……... 53

***Левченко Е.Н.*** Прогнозная оценка обогатимости россыпных редкометалльно-титановых месторождений России на различных стадиях геологоразведочных работ ……... 61

***Черепанов А.А., Александрова Т.Н., Бердников Н.В.*** Первые данные по благородной минерализации высокоуглеродистых сланцев Дальнего Востока и технологии их переработки . 79

***Остапенко Л.А.*** Природные типы руд на Серебрянском месторождении Кимпиче (Верхоянье) и прогноз их обогатимости по данным изучения вещественного состава …….. 85

***Зинчук Н.Н.*** О влиянии вторичных минералов кимберлитов на их технологические свойства …. 99

***Игнатьев Г.В., Перовский И.А.*** Фтораммонийный способ обескремнивания лейкоксенового концентрата Ярегского месторождения ……... 110

***Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.*** Предварительные данные минералого-технологических исследований кварца золоторудного месторождения Майское (северная Карелия) ……. 117

***Наседкин В.В., Демиденок К.В., Боева Н.М., Лыгач В.Н., Васильев А.Л., Белоусов П.Е., Покровская Е.В., Гарбузова И.А., Меренков А.М.*** Органоглины. Вопросы теории и практики ….. 123

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ …… 137

***Мартынова Т.А.*** Влияние факторов регионального и контактового метаморфизма на технологические свойства марганцевых руд ……... 137

***Жукова В.Е., Целюк Д.И.*** Минералого-технологические особенности отходов переработки железных руд месторождений Красноярского края …… 143

***Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П.*** Особенности состава и структуры кварцевых порфиров месторождения Роза-Лампи как источника полевошпатового сырья …….. 152

***Попова Т.В., Ильина В.П., Климовская Е.Е., Фролов П.В., Инина И.С.*** Оценка минерпалого-технологических свойств тремолит-актинолитовых пород Карелии для получения керамики …… 154

***Кевлич В.И., Кукушкина П.И., Трифонова А.В.*** Особенности разрушения кристаллов циркона в процессах дробления и измельчения горных пород ...……... 160

MEMORY
***Академик Николай Павлович Юшкин***……..……..... 166

НАШИ ЮБЛЯРЫ …… 171

***Пирогов Борис Иванович ...***…….. 171

***Кузьмин Владимир Иванович*** ...…….. 173

АННОТАЦИИ …….…… 176

## CONTENTS

INTRODUCTION …….. 5

***Pirogov E.I.*** Technological mineralogy: background and development …….… 7

***Shchiptsov V.V.*** Role and position of technological mineralogy in 21st-century high technologies ..… 37

***Ozhogina E.G., Rogozhin A.A.*** Forecast qualitative evaluation of mineral products by applied mineralogy methods …… 46

***Kotova O.B.*** Mineral surface physics as a method for prognostic assessment of their technological properties …..…… 49

***Sokolova V.N.*** Effect of mineralogical and technological characteristics on selection of innovative solutions for chemical processing of hardly dressable manganese ores ..……..... 53

***Levchenko E.N.*** Forecast evaluation of the dressability of Russia's rare-metal-titanium placer deposits at various stages in geological prospecting ……..... 61

***Cherepanov A.A., Alexandrova T.N., Berdnikov N.V.*** First data on noble-metal mineralization in high-carbon shales of Far Eastern Russia and methods for their processing ..…… 79

***Ostapenko L.A.*** Natural types of ores at Kimpiche silver deposit (Verkhoyanye) and their predictive dressability based on the study of mineralogical composition …… 85

**Zinchuk N.N.** On the effect of secondary kimberlite minerals on their technological properties ..…… 99

***Ignatyev G.V., Perovsky I.A.*** Ammonium fluoride method for desilification of leucoxene concentrate from Yarega deposit ……..... 110

***Danilevskaya L.A., Skamnitskaya L.S., Bubnova T.P.*** Preliminary data from the mineralogical-technological study of quartz from Maiskoe gold deposit, North Karelia ……... 117

***Nasedkin V.V., Demidenok R.V., Boeva N.M, Lygach V.N., Vasilyev A.L., Belousov P.E., Pokrovskaya E.V., Garbuzova I.A., Merenkov A.M.*** Organic clays: theoretical and practical aspects 123

SHORT REPORTS …….. 137

***Martynova T.A.*** Influence of regional and contact metamorphism on the technological properties of manganese ores ……..... 137

***Zhukova V.E., Tselyuk D.I.*** Mineralogical and technological characteristics of iron ore tailings from Krasnoyarsk Region deposits ...…… 143

***Skamnitskaya L.S., Bubnova T.P.*** Compositional and structural characteristics of quartz porphyry from Roza-Lampi deposit, Karelia, as a source of feldspar …..…… 152

***Popova T.V., Ilyina V.P., Klimovskaya E.E., Frolov P.V., Inina I.S.*** Appraisal of the mineralogical and technological properties of Karelia's tremolite-actinolite rocks for pottery production ..……..… 154

***Kevlich V.I., Kukushkina P.I., Trifonova A.V.*** Destruction pattern of zircon crystals upon crushing and grinding of rocks ...……..... 160

IN MEMORIAM of Nikolai Pavlovich Yushkin ...……..... 166

OUR HEROES OF AN ANNIVERSARIES …….. 171

***Pirogov Boris Ivanovich ..***……... 171

***Kuzmin Vladimir Ivanovich*** …… 173

***ANNOTATIONS*** …….…….. 176

# ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ МЕТОДАМИ ПРИКЛАДНОЙ МИНЕРАЛОГИИ

*Под редакцией д.г.-м.н. В.В.Щипцова*

*Печатается по решению Ученого совета*
*Института геологии КарНЦ РАН*

*Издано в авторской редакции*

*На обложке:* Шунгитовый карьер Зажогинского месторождения (Карелия)
Фото *А. С. Парамонова*

Сдано в печать 03.04.13. Формат 60x80 1/8.
Гарнитура «Times». Уч.-изд. л. 20,0. Усл.-печ. л. 21,7.
Тираж 150. Изд. № 364. Заказ 00

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50