

RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY
FEDERAL RESEARCH CENTRE
«KARELIAN RESEARCH CENTRE, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES»
INSTITUTE OF GEOLOGY
FEDERAL STATE BUDGETARY INSTITUTION
«ALL-RUSSIAN SCIENTIFIC-RESEARCH INSTITUTE OF MINERAL RESOURCES
NAMED AFTER N. M. FEDOROVSKY»



**TECHNOLOGICAL MINERALOGY
IN QUALITATIVE APPRAISAL OF MINERAL
RAW MATERIAL OF NATURAL
AND ARTIFICIAL ORIGIN**

Volume of papers based on the presentations
made at the XIV th Russian seminar on technological mineralogy

Moscow, April, 5–6, 2022

Petrozavodsk
2022

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ КарНЦ РАН

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ им. Н. М. ФЕДОРОВСКОГО»



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сборник статей по материалам докладов
XIV Российского семинара по технологической минералогии

Москва, 5–6 апреля 2022 г.

Петрозаводск
2022

УДК 622.7.017(063)
ББК 33.4
Т38

Под редакцией
д.г.-м.н. В. В. Щипцова, к.г.-м.н. Е. Н. Световой

Т38 Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения : сборник статей по материалам докладов XIV Российского семинара по технологической минералогии, Москва, 5–6 апреля 2022 г. / под редакцией В. В. Щипцова, Е. Н. Световой. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2022. – 104 с. : ил. – В надзаголовочных данных: Российское минералогическое общество, Комиссия по технологической минералогии, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Институт геологии КарНЦ РАН, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского». – Библиография в конце статей.

УДК 622.7.017(063)
ББК 33.4

ISBN 978-5-9274-0954-9

© Российское минералогическое общество, 2022
© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2022
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2022
© ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского», 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

5–6 апреля 2022 г в Москве во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н. М. Федоровского провел работу XIV Российский семинар по технологической минералогии «Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения». Эти семинары регулярно проводятся с 2006 года по инициативе комиссии по технологической минералогии Российского минералогического общества (РМО). Организаторами мероприятия в этом году выступили ФГБУ «ВИМС им. Н. М. Федоровского», Комиссия по технологической минералогии РМО, Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр».

Научная программа семинара охватывала следующие направления исследований:

1. Технологическая минералогия в решении проблем комплексной и экологически безопасной переработки минерального сырья;
2. Использование современных методов и подходов в исследованиях минерального состава твердых полезных ископаемых и перспективы интенсификации технологии обогащения минерального сырья;
3. Минералого-технологическая оценка нетрадиционных полезных ископаемых.

В работе семинара приняло участие более 80 человек: доктора и кандидаты наук, научные сотрудники, аспиранты, инженеры, геологи, технологи. Участники представляли академические и отраслевые институты, ВУЗы и коммерческие организации из Апатит, Екатеринбурга, Иркутска, Красноярска, Мирного, Москвы, Санкт-Петербурга, Петрозаводска, Сыктывкара, Уфы.

С приветственными словами на открытии семинара перед собравшимися участниками выступили генеральный директор ФГБУ «ВИМС» О. В. Казанов, президент Российского геологического общества Г. А. Машковцев и председатель Комиссии по технологической минералогии РМО В. В. Щипцов.

На семинаре было сделано 29 устных докладов, в том числе 6 докладов в режиме видеоконференцсвязи и 3 стендовых доклада.

В пленарных докладах было показано современное состояние прикладных минералогических исследований при переработке твердых полезных ископаемых, освещены проблемы, с которыми сегодня сталкиваются минералоги. Уделено внимание минералого-технологическим особенностям различных видов полезных ископаемых, в том числе техногенного происхождения, определяющим технологии их переработки. В современных условиях, основываясь на достоверных максимально полных минералогических данных, необходимо создавать экологически безопасные технологии комплексной переработки труднообогатимого минерального сырья на основе комбинирования эффективных методов обогащения с пирометаллургией.

На семинаре прозвучали доклады по минералогическому материаловедению и экологической минералогии, направлениям технологической минералогии, которые сегодня интенсивно развиваются.

Рассмотрены вопросы экологической безопасности и утилизации горнопромышленных отходов, представляющих серьезную угрозу природным экосистемам. Практический интерес представляли доклады молодых ученых, посвященные минералогическим вопросам исследования руд конкретных объектов. Сложность морфоструктурного состава современных полезных ископаемых требует новых подходов к их минералогическому изучению, комплексированию физических методов анализа, что также нашло отражение в докладах.

Значительная часть материалов опубликована в настоящем сборнике статей.

Участники мероприятия выразили благодарность руководству ФГБУ «ВИМС им. Н. М. Федоровского» за проявленное гостеприимство, оценили возможность посетить выставочный зал с уникальной коллекцией промышленных типов руд и выставку с подборкой научных изданий по технологической минералогии.

После завершения работы семинара состоялось расширенное заседание Бюро комиссии по технологической минералогии РМО, где было принято решение о введении новых членов в состав комиссии и одобрено предложение о проведении следующего XV семинара в мае 2023 года в г. Иркутске.

БУДНИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Ожогина Е. Г., Якушина О. А.

*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья
им. Н. М. Федоровского, Москва*

Прикладная минералогия уже давно в геологических науках заняла лидирующее положение. Еще В. И. Вернадский отмечал, что «...значение минералогической основы учения о рудных ископаемых чрезвычайно усилилось. Учение о полезных ископаемых является сейчас в своей основе, прикладной минералогией...». Он подчеркивал, необходимость создания базы для изучения полезных ископаемых, которые «неизбежно должны вестись на минералогической основе, а не на геологической» [1].

Сегодня в рамках прикладной минералогии решаются задачи, связанные с комплексным освоением месторождений полезных ископаемых: определение качественных характеристик руд месторождений, их вещественного состава, выдержанности качества оруденения в геологических контурах объекта; выявление и оценка типоморфных признаков, определяющих природу технологических свойств минералов полезных ископаемых различных генетических типов, с учетом характера и глубины изменений их на разных уровнях минералогической «памяти». Очевидно, что доминирующим направлением стала технологическая минералогия. Это обусловлено и объективными причинами недропользования. Происходит резкое сокращение запасов легкодоступных, выходящих на поверхность богатых руд и неметаллических полезных ископаемых. Открытие крупных и богатых сырьевых объектов в ближайшей перспективе маловероятно. Вынужденно в промышленное освоение вовлекаются труднообогатимые руды, залегающие в сложных горно-геологических и ландшафтно-климатических условиях. В этой ситуации современные позиции технологической минералогии четко соответствуют определению В. И. Ревнивцева [9], подчеркнувшего, что «в повышении эффективности технологии переработки минерального сырья особая роль принадлежит технологической минералогии. Она составляет фундамент, без которого на современном уровне невозможен целенаправленный научный поиск

как принципиально новых путей развития, так и совершенствования технологии переработки минерального сырья» [7].

Большинство современных руд черных, цветных, редких, благородных металлов сегодня относятся к категории труднообогатимых. Минералогическими признаками трудной обогатимости руд являются:

Поликомпонентный, иногда переменный химический состав – наряду с главными рудными компонентами присутствуют другие металлы, форма нахождения которых может быть различной (изоморфная примесь, самостоятельные минеральные фазы и пр.).

Сложный морфоструктурный состав – совместное присутствие рудных минералов разной формы и размеров, нередко тесно ассоциирующих между собой и с порообразующими фазами, гетерогенное внутреннее строение зерен минералов (спайность, зональность, трещиноватость, пористость, кавернозность, механические включения, пленки окисления и пр.);

Полиминеральный состав – присутствие нескольких полезных рудных минералов в переменных количествах, образующих полиминеральные агрегаты, полезных минералов в весьма незначительных количествах, одного-двух промышленно ценных минералов, в различной степени измененных вторичными процессами, минералов непрерывных и дискретных изоморфных рядов и минералов полиморфных и политипных модификаций и пр.);

Близость физических и физико-химических (технологических) свойств рудообразующих минералов, в первую очередь плотностных и магнитных.

Природные особенности руд определяют необходимость их комплексного изучения для получения достоверной минералогической информации, позволяющей проводить оценку качества сырья и принимать оптимальные решения его дальнейшего использования [8].

Особое отношение сегодня к горнопромышленным отходам, которые в перспективе могут

стать сырьем многих металлов, неметаллических полезных ископаемых, востребованных промышленностью. В тоже время использование горнопромышленных отходов позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

В качестве примера рассмотрим никельсодержащий шлак, полученный в результате электроплавки руд на одном из металлургических комбинатов Южного Урала. Следует отметить, что металлургические шлаки сегодня занимают лидирующее положение среди отходов перерабатывающих производств; в них в большинстве случаев сосредоточено значительное количество полезных компонентов, превышающее их содержание в природных рудах [6]. Как правило, металлургические шлаки представляют собой комплексные руды, отличающиеся присущими только им минералогическими особенностями, которые определяются составом перерабатываемого сырья и происхождением шлаков, связанным с различными металлургическими процессами, нередко с вторичными изменениями.

Отвалы никельсодержащие шлаки сформированы стекловатыми обломками неоднородной, флюидальной текстуры. Главными шлакообра-

зующими элементами являются железо (22.6%), кремний (18.85%), кальций (7.89%), магний (5.7%), которые входят преимущественно в состав стекла, со стеклом также связано небольшое количество алюминия (2.1%) и натрия (0.2%). Помимо этого железо и магний присутствуют в техногенных минералах изоморфного ряда шпинелей, в которых в виде изоморфных примесей могут входить никель (0,14%) и кобальт (0,05%), а также хром (0.94%), титан (0.11%) и марганец (0.38%). По данным рентгенографического анализа шлаки на 95% сформированы аморфной фазой – стеклом. Кристаллические фазы представлены хромитом (2.7%), фаялитом (1%), пирротин (0.5%), пентландитом (менее 0.5%), вюститом (0.15%) и фазой металла со структурой железа, вероятно железом и никелем (Fe, Ni).

Шлакообразующая матрица насыщена точечными и сыпьевидными ультратонкими округлыми, изометричными и продолговатыми включениями рудных техногенных фаз (рис. 1). Наблюдаются структуры течения, представляющие собой извилистые протяженные участки тонкой полосчатости, обусловленные чередованием темных и светлых полос разного оттенка темно-коричневого, бурого, зеленовато-бурого цвета.

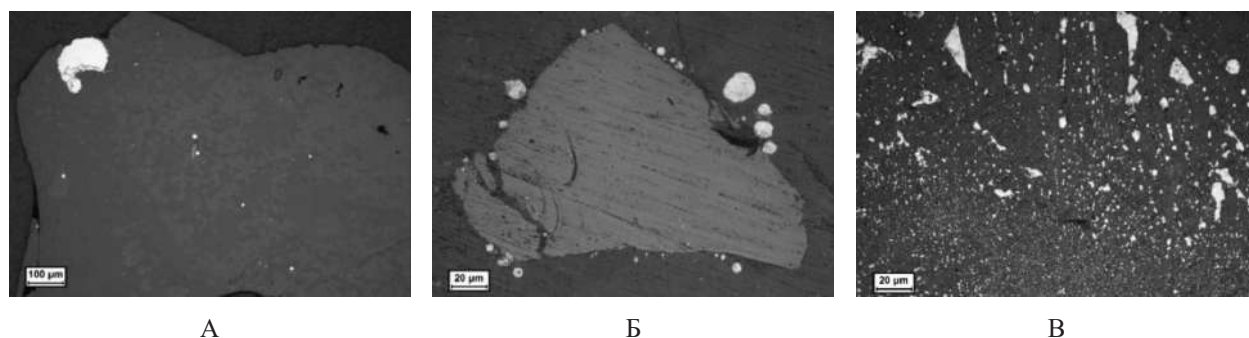


Рис. 1. Никельсодержащие шлаки, формы выделения и детали строения рудных фаз; искусственные полированные шлифы, отраженный свет, николи параллельны. А – неоднородность шлака кремнезем-фаялитового состава, вкрапления округлых выделений пентландита и угловатых включений хромита, серое; Б – включение хромита, по границам которого расположена вкрапленность более мелких округлых и каплевидных выделений пентландита, В – тонкая вкрапленность пентландита в хромите

Хромит – главный рудный минерал, присутствует в виде индивидуализированных выделений неоднородного строения, имеющих кристаллографические очертания граней (гипидиоморфной формы), которые окаймляют ультратонкие выделения пентландита (рис. 2) размер выделений менее 0.1 мм.

Пентландит – присутствует в виде округлых и овальных выделений переменного состава. По данным рентгеноспектрального

микроанализа содержание никеля в нем варьирует от 30.0 до 58.94%, в качестве изоморфной примеси присутствует кобальт (0.65–1.34%). Пентландит формирует двухфазные эвтектические колонии с пирротин.

Пирротин присутствует в виде единичных выделений изометричной и округлой формы. Содержание никеля в минерале изменяется от 0.1 до 0.86%.

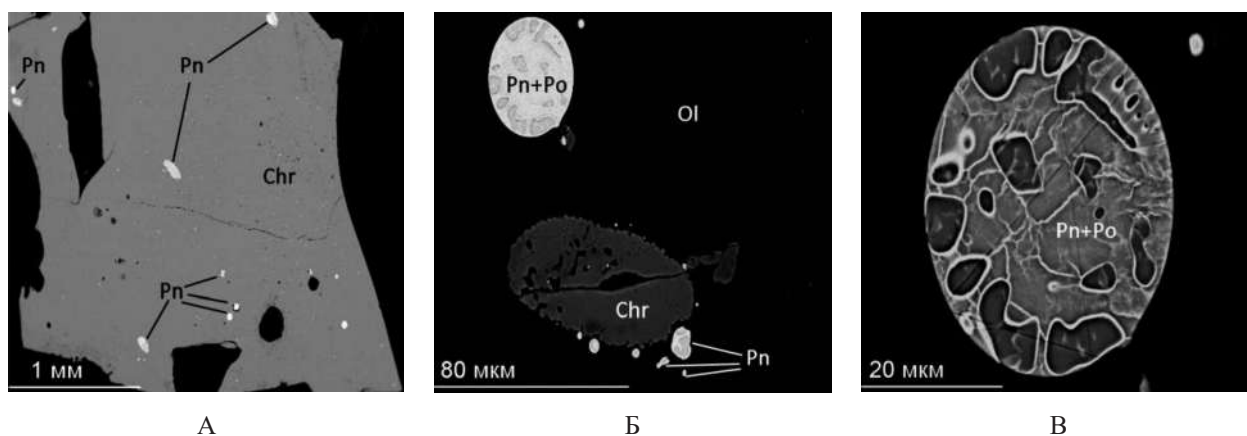


Рис. 2. BSE-изображения никельсодержащих шлаков: А – включения пентландита (Pn) в хромите (Chr); Б – включение хромита и каплевидные неоднородные включения пентландита с пирротинном (Pn+Po) в оливине (Ol); В – увеличенный фрагмент крупного каплевидного включения из (Б)

Фаялит формирует аморфную стекловатую массу шлака. Однако кристаллическую структуру по данным рентгенографического фазового анализа имеет не более 1 % выделений фаялита, в его состав могут изоморфно входить катионы кальция и других металлов. Оливиновое стекло представляет собой аморфную стекловатую матрицу шлака.

В результате исследования, проведенного комплексом физических методов, установлено, что минералогические особенности шлаков (ультратонкие размеры выделений рудных фаз 0.001–0.02 мм, неоднородное строение, поликомпонентный состав и варьирующие содержания металлов, связанное с широкими изоморфными замещениями атомов химических элементов в кристаллической структуре минералов, отсутствие электропроводности и магнитных свойств) неблагоприятны для их вторичного обогащения механическими методами. Однако индивидуализированная форма выделений рудных и металлических фаз, высокое содержание никеля, сопоставимое с промышленным, отсутствие вредных и токсичных примесей (как изоморфных, так и в виде минеральных фаз) позволяют говорить о возможности их передела химико-металлургическими методами для извлечения металлов. Самостоятельное направление технологической минералогии – минералогическое материаловедение, в рамках которого разрабатываются принципы выбора и создания материалов из минерального сырья, включая отходы его добычи и переработки.

Сегодня круг задач, решаемых в рамках минералогического материаловедения, весьма

значительный. В большинстве своем эти задачи пересекаются или дополняют главные задачи технологической минералогии в целом. Они включают:

- комплексное использование минерального сырья за счет безотходных технологий;
- использование экологически дружественных технологий получения материалов различного назначения из минерального сырья природного и техногенного происхождения;
- создание материалов, обладающих благоприятным сочетанием эксплуатационных свойств и себестоимостью изготовления;
- близость сырьевых объектов к предприятиям, изготавливающим материалы с заданным составом, строением, свойствами [2].

В последние годы Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского проводит значительный объем минералогических исследований, связанных с керамическими изделиями. Как показывает опыт, в этой области востребованы работы, касающиеся, во-первых, оценки пригодности сырья для производства керамических изделий, например, кирпича, плитки и пр. Во-вторых, минералогические методы позволяют решать вопросы, связанные с контролем качества изделий на разных стадиях технологического процесса и уже готовой продукции [3].

Для изготовления качественных керамических изделий важное значение имеет прогнозирование состава исходной массы и режимов ее обжига. Следовательно, необходима достоверная информация о вещественном составе исходного сырья, так как определенные минеральные

фазы обычно отвечают за физико-механические показатели изделий (цвет, водопоглощение, морозостойкость, кислотостойкость, огнеупорность и т. д.). Сведения о минеральном и химическом составе исходного сырья (глинистых, песчано-глинистых пород, отходов добычи и переработки полезных ископаемых) могут способствовать управлению процессами фазообразования при обжиге, определять необходимые добавки в шихту.

Минералогические исследования широко используются при решении экологических задач, связанных не только с горнопромышленными отходами, но и определением форм нахождения токсичных и вредных элементов, их локализацией в депонирующих средах, воздействием на окружающую среду [5,10]. При этом отдельно следует оговорить минералогические работы в области медицины, которые проводятся не только с целью определения влияния минералов, горных пород и руд при добыче и переработке полезных ископаемых на здоровье человека. Сегодня востребованы работы по минералогическому изучению продуктов жизнедеятельности человека, способствующие нередко диагностировать болезни, прогнозировать и их течение.

В зависимости от решаемых задач используется комплекс методов минералогического анализа. Минералогический анализ сегодня – это комплекс методов изучения горных пород, руд, техногенного сырья и продуктов их переработки, направленный на получение надежной информации об их минеральном (фазовом) составе и морфоструктурных характеристиках, реальном составе, строении, технологических (потребительских) свойствах слагающих их минералов. В зависимости от цели и задач исследования определяется индивидуальный комплекс методов, последовательность их применения, позволяющий получить максимально необходимую информацию, которая в дальнейшем может быть использована для принятия тактических и стратегических решений [11].

Минералогические исследования, всегда сопровождающие геологоразведочные работы, в том числе технологические испытания и эко-

логическое изучение, непосредственно влияют на их эффективность. Главным требованием к лабораторным минералогическим работам является получение полной, достоверной, метрологически оцененной и имеющей юридическую силу информации о составе и строении минеральных объектов природного и техногенного происхождения. Достоверность и сопоставимость результатов выполняемых анализов требует метрологического обеспечения всех видов минералогических работ. Следовательно, необходимо совершенствование системы управления качеством аналитических (минералогических) работ, включающей стандарты, регламентирующие контроль качества измерений на всех этапах работ, разработку, апробацию и внедрение методик количественного минералогического анализа, а также массовых анализов, минералов, руд и пород, создание средств метрологического контроля. Как показывает опыт, требуются новые научно-обоснованные методические документы, обеспечивающие единство и требуемую точность определений, достоверные результаты при минимуме материальных затрат [4].

Современная прикладная минералогия, обладая мощным арсеналом приемов и методов исследований, в значительной степени влияет на эффективность геологоразведочных работ и использование минеральных ресурсов природного и техногенного происхождения. Глубина минералогических исследований минеральных объектов определяется задачами работ, а достоверность результатов анализов – метрологическим обеспечением всех видов работ. Современный методический комплекс минералогических исследований позволяет решать задачи любой сложности: от крупномасштабных, связанных с добычей и переработкой минерального сырья, ликвидацией последствий освоения месторождений, вторичным использованием техногенного сырья, до частных – выявления источников загрязнения конкретных объектов и идентификации опасных минералов (фаз), оценкой их воздействия на экосистемы и пр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В. И. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. IV, кн. 1. С. 624.
2. Верхотуров А. Д., Ершова Т. Б. Минералогическое материаловедение новый раздел науки о материалах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2005. С. 205–213.
3. Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Сычева Н. А. и др. Минералогическое материаловедение (производство керамических изделий) // Минералого-технологическая оценка новых видов минерального сырья. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2019. С. 60–63.

4. Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Технологическая минералогия в решении проблем комплексной переработки минерального сырья // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 2(48). С. 170–178.

5. Ожогина Е. Г., Шадрюнова И. В., Чекушина Т. В. Роль минералогических исследований в решении экологических проблем горнопромышленных районов // Горный журнал. 2017. № 11. С. 105–110.

6. Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Козлов А. П. Минералогические особенности никельсодержащих шлаков и перспективы их вторичного использования // Обогащение руд. 2017. № 3(369). С. 49–56.

7. Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г. Принципы и методы технологической минералогии при переработке твердых полезных ископаемых // Вестник геонаук. 2020. № 2(302). С. 11–14.

8. Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г., Горбатова Е. А. Минералого-технологическая оценка труднообогатимого рудного сырья (на примере железных руд и отходов обогащения) // Горный журнал. 2019. № 4. С. 59–64.

9. Ревнивцев В. И., Доливо-Добровольская Г. И., Владимиров П. С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1992. 248 с.

10. Чантурия В. А., Ожогина Е. Г., Шадрюнова И. В. Задачи экологической минералогии при освоении недр Земли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 5. С. 193–196.

11. Ozhogina E. G., Kotova O. B. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment // IMPC 2018–29th International Mineral Processing Congress. 2019. Moscow. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. P. 32–40.

DOI: 10.17076/tm14_31

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНОГО ВУЛКАНОГЕННОГО МАТЕРИАЛА В СВЯЗИ С ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОБЛЕМАМИ В АЛМАЗОНОСНЫХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Зинчук М. Н., Зинчук Н. Н.

ЗЯНЦ АН РС(Я), Мирный

Региональные исследования древних платформ Мира свидетельствуют о весьма длительном развитии процессов денудационного выравнивания и глубоком срезе ряда обширных территорий, в том числе и Восточно-Сибирской платформы (ВСП), неоднократно проявлявшихся на протяжении всей геологической истории Земли [1–6]. В основных алмазоносных районах ВСП, судя по сохранившимся корам выветривания (КВ) и продуктам их перемыва и переотложения, наиболее мощные эпохи корообразования существовали в позднедевонское-раннекаменноугольное и средне-позднетриасовое время [7–10]. Учитывая среднепалеозойский возраст кимберлитовых тел региона, указанные эпохи являлись решающими для формирования древних россыпей алмазов. Более молодые КВ сохранились от размыва в единичных разрезах малой мощности и практического интереса не представляют, а более древние на исследуемой территории не установлены. Следует отметить, что в фанерозое, кроме общих черт в геологическом развитии и структурной позиции, отмечаются и существенные различия, приводящие к специ-

фическим особенностям размыва и захоронения продуктов КВ. Так, в позднем девоне – раннем карбоне породы Далдыно-Алакитского алмазоносного района (ДААР) были размывы существенно меньше (до первых десятков метров), чем в Малоботуобинском (МБАР). Всё это привело к различным условиям аккумуляции в терригенных отложениях эродированного алмазоносного материала. Поэтому в ДААР при незначительном размыве пород этот материал образовывал первичные ореолы рассеяния (обычно без повторного размыва и переотложения), затем захоронялся. В отличие от этого, в МБАР при значительном (до 300 м) размыве сначала формировались первичные ореолы рассеяния кимберлитового материала, которые затем перемывались и переотлагались в средне-верхнекаменноугольных отложениях. Наряду с широко развитыми на этой территории площадных КВ на терригенно-карбонатных породах, для упомянутых алмазоносных районов довольно характерны элювиальные образования трапповой и кимберлитовой формаций. Для определения их продуктивности

некоторая часть каменного материала горных выработок подвергалась технологическому обогащению. Трапповые покровы, интрузии и силлы представлены долеритами, а также туфами, туфобрекчиями и туфогенными образованиями. *Трубки взрыва пород трапповой формации* наиболее характерны для различных частей МБАР, т. е. разных его позднепалеозойских и мезозойских структурно-формационных зон. Меньшая устойчивость туфов и туфобрекчий к процессам корообразования, по сравнению с вмещающими их породами, позволяет наиболее рельефно проследить на них закономерность более интенсивного развития (независимо от типов пород субстрата) и лучшей сохранности КВ в пределах денудационной поверхности выравнивания, территориально совпадающей с конседиментационными палеоподнятиями и их склонами, по сравнению с денудационно-аккумулятивными и аккумулятивными поверхностями, соответствующими палеовпадинам. Поэтому туфобрекчии трубчатых тел на Мирнинском палеоподнятии (А-48, А-49, А-50 и др.) подверглись выветриванию на значительную глубину. Здесь под нижнеюрскими осадочными толщами и породами трапповой формации (долеритам) вскрыта КВ значительной мощности (до 90 и более метров). В таких разрезах установлены и более зрелые её горизонты. В отличие от этого, в центральных частях Кюеляхской верхнепалеозойской впадины и Ангара-Вилуйского мезозойского прогиба на туфах и туфобрекчиях трубок взрыва (А-200, А-220, А-400 и др.) устанавливаются только самые нижние горизонты (зоны дезинтеграции и начального выщелачивания) КВ мощностью в несколько метров. Стоит также отметить, что в пределах Мирнинского палеоподнятия, наряду с трубками взрыва, выветрелыми на значительную глубину, встречены трубчатые тела (А-88, А-103 и др.) со слабо выраженными процессами корообразования. Такое положение можно объяснить [11–13] различной степенью переработки агломератовых туфов и туфобрекчий трубчатых тел гидротермально-метасоматическими процессами как в период их становления, так и в дальнейшем при гипергенном преобразовании. Чем интенсивнее эти породы подверглись подобной переработке, тем менее устойчивыми они становились к процессам выветривания. Ярким примером этого является трубка А-49, по сильно измененным гидротермально-метасоматическими процессами породам которой в позднедевонское-раннекаменно-

угольное время интенсивно и на значительную глубину развивались процессы корообразования [14–16]. Так, скважина глубиной около 100 м в центре трубки не вышла из измененных пород. Перекрывается это тело долеритами и нижнеюрской осадочной толщей мощностью до 17 м.

Кора выветривания на туфогенных образованиях корвунчанской свиты нижнего триаса, по сравнению с другими гипергенными площадными образованиями этих же территорий (КВ на терригенно-карбонатных породах и долеритах) имеет ограниченное распространение [1–6]. Такие туфогенные породы нижнего триаса сохранились от размыва в виде относительно больших полей лишь в самой северо-западной части МБАР. На остальной территории траппового плато отмечаются [1, 5] мелкие разобщенные сложных очертаний останцы этих пород, выполняющие отрицательные формы раннетриасового рельефа. Сохранившаяся мощность КВ туфогенных образований корвунчанской свиты составляет первые метры, реже достигая до 27 м. Повышенная мощность профилей такой КВ отмечается только в случае перекрытия её нижнеюрскими осадочными толщами. На породах корвунчанской свиты обычно сохранилась от размыва лишь нижняя зона (дезинтеграции и начального выщелачивания) КВ и только в отдельных разрезах большей мощности отмечается её более зрелая часть. Наиболее детально изучена средне-позднетриасовая КВ на туфогенных образованиях корвунчанской свиты в северной части МБАР, где мощность достигает 13 м. Перекрываются они осадочными нижнеюрскими породами мощностью до 5 м. Выветрелые породы представлены зеленовато- и желтовато-серыми или коричневыми агломератовыми туфами и туфобрекчиями. Обломочный материал (алевролиты, терригенно-карбонатные породы, долериты, гравий кремнистых пород и др.) в отдельных участках составляет до половины объема туфогенных образований. Структура материнских пород кристалло-литовитрокластическая, псефито-псаммитовая, участками до псаммитовой. Цементирующая масса сложена изотропным пепловым материалом (бурой и грязно-бурой окраски) с обломками различных пород (траппов, алевролитов и кварцитов) и некоторых минералов (кварца, полевых шпатов, биотита и др.). В этих довольно плотных туфогенных породах отмечаются следы вторичных изменений – ожелезнения, пиритизации и кальцитизации. По мере выветрелости пород

изменяется их окраска. Реликты структур исходных туфогенных образований отмечены по всему изученному разрезу [17–20].

Результаты проведенной нами [2–6] работы с помощью кластер-анализа данных о химическом составе различных петрохимических типов пород подчеркнули, что резкие различия в их химизме наблюдаются, с одной стороны, у ультраосновных и основных разновидностей, а с другой – у средних и кислых. Соответственно, выветривание первично минералов первой группы (меланократовых) сопровождается выносом щелочных (Na, K) и щелочно-земельных элементов, а также избытка Si и окислением подавляющей части Fe^{2+} , приводит к повышению лейкократовости [2]. С другой стороны, элювиальные продукты второй (лейкократовой) группы пород характеризуются увеличением их меланократовости, что связано с опережающим выносом Si по сравнению с накоплением Al. В результате этого происходит своеобразное сближение как химического состава, так и минералогических особенностей элювиальных продуктов, развитых на породах различного состава. Специфическими являются особенности гипергенного и геодинамического изменения вулканогенного материала, входящего в состав различных пород. Так, вулканические компоненты, составляющие существенную часть дискретного и лавообразного материала, в открытой системе минералообразования (на континенте) первоначально кристаллизуются в минералы группы смектита. Различный химический состав поступающего из эруптивных аппаратов и накапливающегося в континентальных водоёмах вулканического материала различного состава обуславливает вынос указанных выше элементов и гетеровалентные превращения. Заполнение октаэдрических позиций в структуре отдельных разновидностей смектитов, возникающих за счет выветривания различных петрохимических типов пород, заимствуется от химического состава последних и изменяется от Mg-Fe^{2+} до Al-Fe^{3+} – типа. Природа межслоевых катионов этой группы минералов определяется характером среды минералообразования [3]. По активности главных обменных катионов при их взаимном замещении, они располагаются в следующем порядке: $\text{Li} < \text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca} < \text{H}$. Это обуславливает тенденцию последовательного вытеснения из межслоевых позиций в структуре первично возникающего смектита слабо устойчивых элементов

и обогащение указанных позиций по мере развития гипергенного процесса наиболее устойчивым из щелочных и щелочно-земельных катионов – Ca. Так, подвергшиеся выветриванию эффузивные трапповые покровы долеритов в северной части МБАР СП представлены [9–12] серыми и темно-серыми разнотекстурными образованиями, содержащими в исходном состоянии плагиоклазы (лабрадор и битовнит), моноклинные пироксены (авгит), ильменит, магнетит, оливин, биотит, иддингсит и стекловатый мезостазис. Процесс гипергенного изменения долеритов начинается с развития в массивных отдельностях породы системы трещин с выделением на образованных ими поверхностях частиц основных плагиоклазов зародышей новых фаз в виде кристаллитов. Последние являются начальными фазами возникающего позднее по ним Mg-Fe^{2+} – содержащего монтмориллонита, который, как неустойчивый в зоне гипергенеза минерал, быстро подвергается частичной диоктаэдризации с образованием ди-триоктаэдрической фазы Mg-Fe^{3+} -типа. Выделяющиеся при этом избытки окисного железа обуславливают возникновение гидрогетита. За счёт Na^+ , выделяющегося при разложении плагиоклазов, образуется Na-монтмориллонит, который в богатой Ca среде последовательно переходит в Са-разновидность. По биотиту в окислительных условиях развивается вермикулит, который в гипергенных условиях переходит в ассоциацию вермикулита и ди-триоктаэдрического монтмориллонита, а также вермикулит-монтмориллонитовое смешанослойное образование. По мере дальнейшей диоктаэдризации последней фазы и прогрессирующего выноса щелочей и щелочных земель из продуктов деструкции Al-Fe^{3+} – монтмориллонита синтезируется каолинит. Близкий механизм гипергенного преобразования исходного материала свойственен также взрывным породам, которые нами комплексно изучены на примере туфов и туфобрекчий трубок взрыва этого же алмазоносного района ВСП. Однако иной агрегатный характер этих пород, по сравнению с массивными долеритами, обуславливает повышенную интенсивность промывного режима вулканогенного материала и соответственно более высокую скорость его преобразования. Это объясняется быстрым течением процесса диоктаэдризации первично возникающих слоистых силикатов, а также ранним появлением в профиле коры выветривания (КВ) каолинита. По близкому к долеритам основного

состава направлению происходит гипергенное преобразование кимберлитов ультраосновного состава, с одной стороны, и туфогенных – с породами кислого состава [1, 2].

Сравнение кинетики как преобразования минералов группы смектитов и смешанослойных образований, так и возникновения каолинита в профилях КВ различных петрохимических типов пород показывает [3–6], что в элювии ультраосновных и основных пород смектит и смешанослойные образования сохраняются более длительное время, чем в средних и кислых. Это связано с необходимостью выноса из профилей КВ первой группы Mg, перехода Fe^{2+} в оксиды и гидроксиды Fe^{3+} , преобразования первичного триоктаэдрического смектита в диоктаэдрическую разновидность. Одновременно с этим сапонит, возникающий по Mg–Fe-минералам, а также монтмориллонит, образующийся по относительно гомогенным плагиоклазам ультраосновных и основных пород, обладает более высокой степенью упорядоченности структуры, по сравнению с одноименными минералами, развивающимися по более гетерогенным плагиоклазам, свойственным средним и кислым породам. При этом, соответствующая степень упорядоченности структуры три- или диоктаэдрического смектита наследуется также и в процессе дальнейшего преобразования по нему каолинита. Эти фазы приурочены к продуктам гипергенного изменения различных в гетерогенном отношении основных и средних изверженных пород как интрузивного, так и эксплозивно-эффузивно-экструзивного типа. В этом случае при условии интенсивного промывного режима по образовавшимся в профилях выветривания реакционно активным, преимущественно разбухающим минералам, особенно с триоктаэдрическим мотивом заполнения октаэдрических позиций в их структуре, возникает указанная смешанослойная фаза. При выветривании туфов и туффитов, начиная с нижних горизонтов, нередко возникает смектит Al– Fe^{3+} , т. е. монтмориллонит. Значительно меньшее содержание в средних и кислых породах Mg и Fe^{3+} определяет более развитие в профилях выветривания по монтмориллониту каолинита, вплоть до полного исчезновения разбухающего минерала в верхних горизонтах элювиальной толщи. Существенное значение в областях нивального климата имеет также биохимическое изменение вулканических пород. Отмеченное выше сближение как химического состава [4],

так и минералогических особенностей гипергенных продуктов к верхам элювиальных толщ показывает, что диагностическими являются их средние горизонты. Поэтому по резко различным ассоциациям в них гипергенных минералов можно определять петрохимический тип исходных, т. е. подвергшимся выветриванию пород. Образующийся в профилях КВ элювий при перестройке тектонического плана территории подвергается денудации. Переотлагающиеся в таком случае продукты в зависимости от тектоно-морфологического и гидрохимического характера областей осадконакопления в дальнейшем могут входить в состав различных осадочных формаций (главным образом терригенная-платформенная и геосинклинальная субформации, а также терригенно-карбонатная формации), в которых элювиальный материал накапливается либо в разуплотненном состоянии, либо в виде формации переотложенных КВ.

Таким образом, анализ полученных данных по результатам изучения КВ на туфах и туфобрекчиях трубчатых тел, а также туфогенных образованиях корвунчанской свиты показал отсутствие четкой зональности и их строения даже в профилях большой мощности. Несмотря на кажущуюся однородность этих толщ, рентгенографические, электронографические и электронно-микроскопические исследования позволили существенно детализировать установленные закономерности формирования продуктов выветривания. Так, в отличие от КВ на таких полнокристаллических и монолитных породах как долериты (которые близки по составу с туфогенными брекчиями) в КВ туфов и туфогенных пород отмечается значительно большая дисперсность глинистых образований, что можно объяснить дискретностью материнских пород, представленных агрегатами мелких обломков пород и вулканического стекла. Это обеспечивало интенсивное промывание (особенно в трубчатых телах) и вынос уже на первых стадиях выветривания Ca и Mg, а также окисление Fe^{2+} . Обеднение пород Mg и Fe^{2+} связано в основном с разложением хлорита. При этом в нижних частях профилей выветривания (т. е. на ранней стадии преобразования пород) по первичным железистым минералам (магнетит и др.), содержащим в основном двухвалентное железо, развиваются псевдоморфозы в виде безводного оксида Fe – гематита. Выше по разрезу последний переходит в наиболее устойчивый в гипергенных условиях гидроксид Fe – гётит.

При окислении Fe^{2+} в структуре хлорита и разложении последнего вначале возникает гематит, который по мере усиления выветрелости пород также переходит в гётит. Биотит последовательно трансформируется в парагенетическую ассоциацию вермикулита и монтмориллонита. Последний на ранних этапах выветривания в связи с наличием в структуре преимущественно Mg и Fe^{3+} близок к ди-триоктаэдрическому типу. Проведенными исследованиями показано, что первичный вулканогенный материал, испытывающий существенное изменение в полных профилях КВ под действием гипергенных процессов, в значительной мере теряет присущие ему специфические свойства, сближаясь с продуктами изменения пород самого различного генезиса. Однако в умеренных климатических поясах, при неполных профилях КВ, нередко геодинамическим воздействиям и размыву под-

вергается элювиальный материал, соответствующий средним (и даже нижним) горизонтам элювиальных толщ, которые четко отражают физико-химическую и минералогическую природу исходных пород. Вследствие этого, поступающие из областей сноса вулканогенный материал, попадая в пресные континентальные водоёмы, обычно сохраняет первичные структурно-морфологические свойства первичных минералов, особенно при недалеком и спокойном их переносе. Размыв и перенос временными водными потоками и постоянными речными артериями первичного пирокластического материала приводит к определенной его деградированности, позволяющей уверенно отличать такие продукты от вновь образованных аутигенных выделений, возникших под действием седиментационных и диагенетических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3. С. 281–288.
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 366–369.
3. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логвинова А. Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки РМО. 2009. Т. 138. № 2. С. 1–13.
4. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Тычков С. А. Проблема докембрийской алмазоносности Сибирской платформы // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2002. № 1. С. 19–36.
5. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. 2000. № 3(9). С. 37–55.
6. Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В. П., Денисенко Е. П., Барышев А. С., Меньшагин Ю. В., Кошкарев Д. А. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Сб.: Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК „АЛРОСА“ и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Мирный: МГТ. 2003. С. 50–84.
7. Зинчук Н. Н. Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. 1992. № 7. С. 99–109.
8. Зинчук Н. Н. Актуальные проблемы минерогенеза алмаза // Мінералогічний збірник. 2017. № 64. Вып. 1. С. 50–65.
9. Зинчук Н. Н. Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 105–111.
10. Зинчук Н. Н. Вещественные критерии алмазоносности кимберлитов // Мінералогічний збірник. 2017. № 67. Вып. 1. С. 50–65.
11. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлисов А. П. Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2002. № 1. С. 47–60.
12. Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазописковых работ // Горный вестник. 1997. № 3. С. 53–57.
13. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Борис Е. И., Липашова А. Н. Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // Руды и металлы. 1999. № 3. С. 18–31.
14. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И. Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 1. С. 87–96.

15. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н. Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 42–53.
16. Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. 1987. № 10. С. 66–72.
17. Котельников Д. Д., Домбровская Ж. В., Зинчук Н. Н. Основные закономерности выветривания силикатных пород различного химического и минералогического типа // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 6. С. 594–601.
18. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдястых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1996. № 1. С. 53–61.
19. Мацюк С. С., Зинчук Н. Н. Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. М.: Недра, 2001. 428 с.
20. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // Докл. АН СССР. 1987. Т. 296. № 5. С. 1228–1233.

DOI: 10.17076/tm14_32

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРАФИТОВЫХ РУД ФЕННОСКАНДИНАВСКОГО ЩИТА

Щипцов В. В.^{1,2}, Бубнова Т. П.¹, Никифоров А. Г.¹, Фролов П. В.¹

¹ *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*

² *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

В настоящее время предъявляются высокие требования к чистоте и кристаллической структуре графита, используемого в современных высоких технологиях. Все известные методы очистки графита можно разделить на три типа: химико-термическое, термическое и газотермическое рафинирование. С 2011 г. Европейский Союз включил природный графит в список критически важных сырьевых материалов [5, 13].

Основные области использования графита в современных технологиях выделены в три группы. В первую группу входит промышленный графит с размером частиц >200 мкм (фольга и экранирование (нуклеарный класс), высокотехнологичные компоненты батарей (СЕМ). В общем объеме важных сырьевых материалов данная группа составляет 35%. Вторая группа включает размеры <200 мкм (электроды (ЭАФ), тигли, части ракеты). Ее объем достигает 45%. Третья группа с размером частиц <150 мкм объединяет выпуск батарей БАМ и ГЭМ, огнеупоров, пресс-форм, синтетических алмазов, порошкообразных металлов, дымомаскирующих средств (технология ослабления ЭМ), смазочных материалов и составляет 20%.

Графит, как важный компонент коммерческих литий-ионных батарей, будет широко востребован в ближайшем и среднесрочном будущем. В подавляющем большинстве литий-ионных батарей в качестве анодного материала исполь-

зуется графитовый порошок. Графитовые аноды отвечают требованиям к напряжению большинства литий-ионных катодов, поскольку они относительно доступны по цене, очень легкие, пористые и прочные. В связи с этим природный графит рассматривается как перспективный анодный материал благодаря его высокой обратимой емкости, стабильности цикла, более высокой чистоте и более подходящему распределению частиц по размерам.

Динамика спроса начинается от нулевого показателя в 2015 году и будет резко увеличиваться по прогнозу спроса на шаровидный графит (SPC) и природные аноды на период 2015–2040 гг. По данным компании Benchmark Mineral Intelligence, к 2040 году спрос достигнет уровня 4 000 000 тонн чешуйчатого графита.

Преобладающая часть запасов чешуйчатого графита сосредоточена в Китае, на Мадагаскаре, в Зимбабве, Бразилии, Норвегии, Украине, России. Отметим, что существуют три природных морфотипа графита: а) чешуйчатый графит – кристаллические мелкие чешуйки графита в виде отдельных плоских, похожих на пластины, частиц с содержанием С 80–98%; б) дисперсный некристаллический аморфный графит с содержанием С 70–85%; в) кусковой (жильный) графит в трещинных жилах или разломах в виде массивных пластинчатых

наростов волокнистых кристаллических агрегатов с содержанием С 90–95 %. Руды чешуйчатого кристаллического графита, полосчатые и вкрапленные, обладают резко выраженной анизотропностью электрического сопротивления.

Чешуйчатый графит связан с метаморфическими породами условий высоких давлений, где органический углерод, отложенный в осадочных породах, преобразуется в графит под воздействием давления, обычно превышающего 5 кбар, и температуры около 650–700 °С [17].

Метаморфические реакции, в результате которых образуется графит, приводят к высокой электропроводности, поляризуемости и пониженной теплопроводности [8, 12].

Из истории графитового промысла

На Фенноскандинавском щите графитовые руды и графитноносные породы известны с давних пор. В Норвегии первый графитовый рудник существовал на юге страны в период с 1768 по 1775 гг. Здесь находятся остатки первой шахты по добыче графита (Энглидальский карандашный завод) [15] в рудном графитовом районе (рис. 1). В настоящее время в этой стране зарегистрированы 75 месторождений и проявлений графитовых руд, два из них отработаны

(Rendalsvik и Jennestad), рудник Skaland действует.

В Королевстве Швеция графитовые проявления также были известны несколько столетий назад на севере страны в современных контурах рудного графитового поля Nunasvaara (на рис. 1 обозначено цифрой 6). В начале 1980-х годов графитовые проявления были выявлены в округе Гевлеборг (Центральная Швеция) (рис. 1, цифра 5). Здесь находятся четыре месторождения графита – Kringel (Kringelgruvan), Gropabo, Mattsmyra и Mansberg [18]. К наиболее изученному объекту относится месторождение Kringel.

В Финляндии в период с 1760 по 1947 гг. эксплуатировалось около 30 месторождений графита. 20 из них расположены у современной границы Финляндии с Россией. Общая суммарная добыча на этих месторождениях составила около 14000 т графита [20]. К одному из важных участков на графитовое сырье относится рудное поле Piipumäki, названное авторами по одноименному месторождению (рис. 1, цифра 7) и включает месторождения Piipumäki, Kärpälä, Viistola, Нарамäki. Крупное месторождение Kärpälä разрабатывалось до 1947 г. в промышленных целях [22].

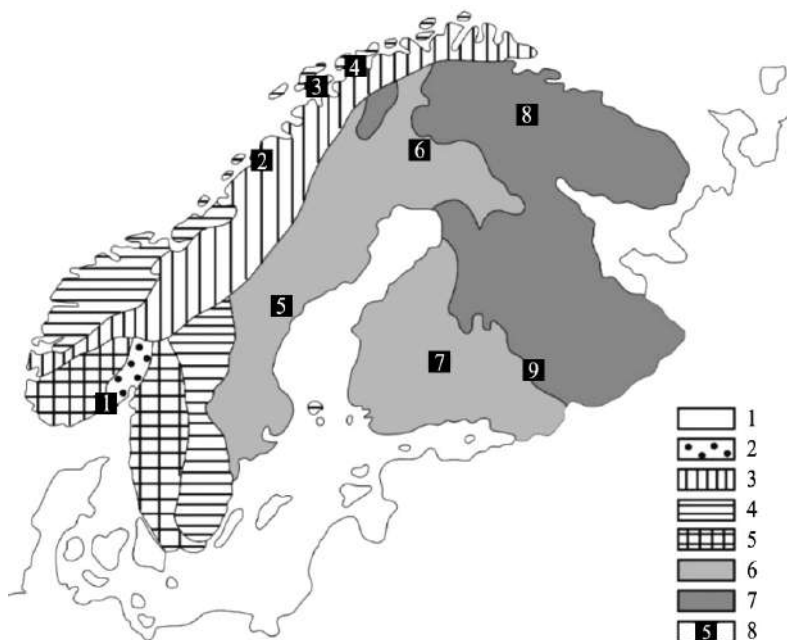


Рис. 1. Размещение графитовых рудных районов на Фенноскандинавском щите

1 – фанерозой < 550 млн лет; 2 – Осло рифт, 250–300 млн лет; 3 – Скандинавские каледониды, 400–700 млн лет; 4 – Юго-Западная гнейсовая провинция, 900–1700 млн лет; 5 – Трансскандинавский магматический пояс, 1650–1800 млн лет; 6 – Свекофеннская провинция, 1800–2000 млн лет; 7 – Архейские и палео-мезопротерозойские комплексы пород (1600–3400 млн лет); 8 – графитовые рудные районы (1 – Bample; 2 – Holandsfjord; 3 – Lofoten-Vesterålen; 4 – Senja; 5 – Woxna; 6 – Nunasvarra; 7 – Piipumäki; 8 – Сальютундра; 9 – Ихала

Что касается Республики Карелия, то в 1787 г. Самуил Алопеус на берегах Ладожского озера встретил обломки «карандаша» – графита. Для истории горного промысла интерес представляет проявление графита Кимамяки, расположенное в 13 км от г. Сортавала. В XIX веке в Кимамяки добывали до 20–30 т (всего 450 т) графитосодержащих сланцев. Графитовые каменоломни были также сосредоточены в окрестностях г. Сортавала и Питкяранта.

В 1830-х началась добыча графитосодержащих сланцев на о. Пусунсаари. Добыча графита велась в небольших масштабах попутно с разработкой месторождений других видов сырья. Наиболее крупным предприятием была шахта Шварц–1, где в 1890–1892 и 1914 гг., помимо железной и медной руды, добыто 120 т графита [2].

На рисунке 2 приводится схема размещения графитовых руд Ладожской протерозойской структуры [3].

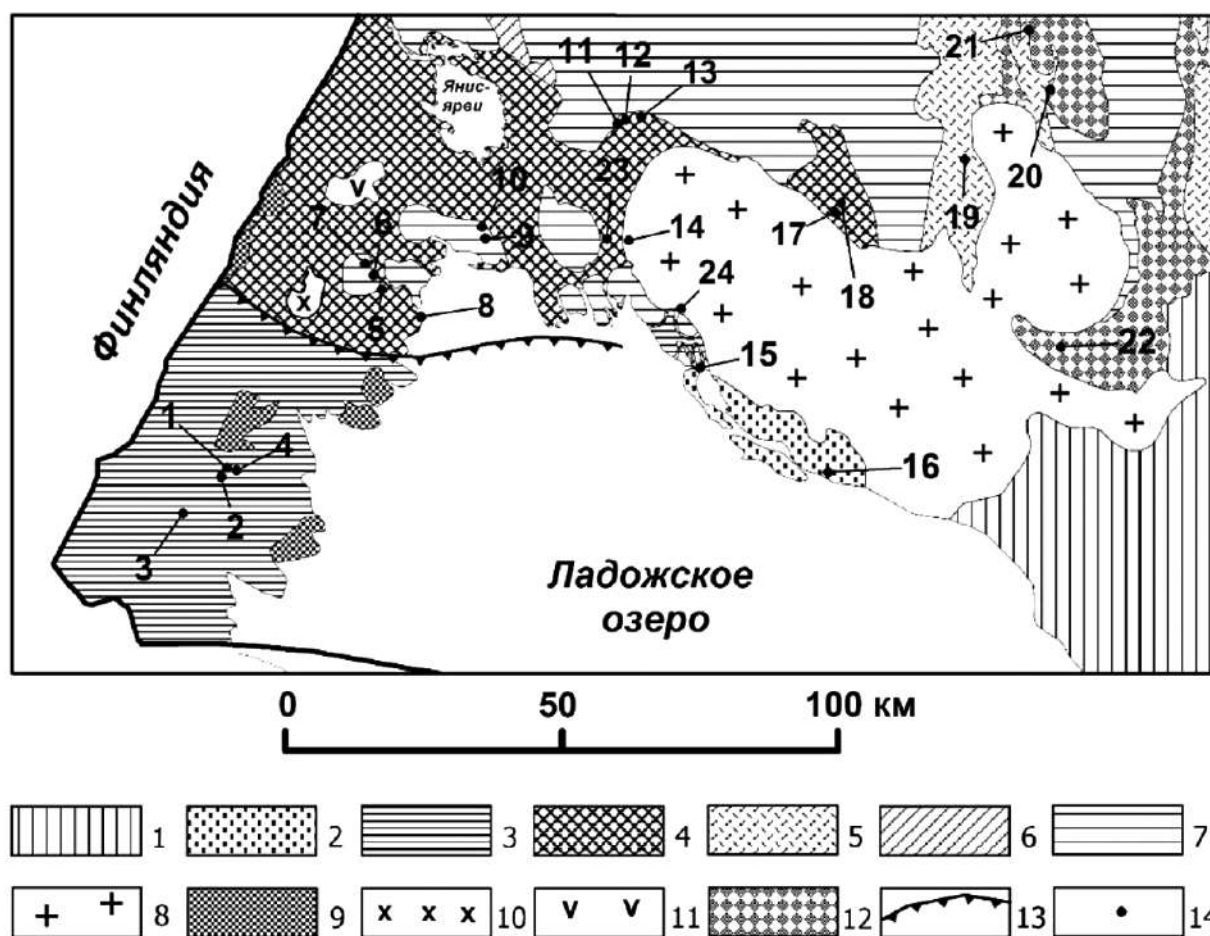


Рис. 2. Схема размещения основных месторождений и крупных проявлений графита Ладожской протерозойской структуры. Составил В. В. Щипцов на адаптированной геологической основе с использованием материалов Geogeological Map of the Fennoscandian Shield. Scale 1: 2 000 000. GSF, GSN, GSS и ГУП «Минерал»

Условные обозначения: 1 – объединенный венд и палеозой; 2 – рифей (приозерская и салминская свиты); 3 – калевий (ладожская серия) и вепсий; 4 – ятулий-людиковый нерасчлененные (соанлахтинская и питкярантская свиты сортавальской серии); 5 – зеленокаменные пояса; 6 – нерасчлененный архей; 7 – архейский комплекс ТТГ; 8 – анортозит-рапакивигранитный комплекс (1.547–1.530 млрд лет); 9 – посторогенные калиевые ультрамафиты до субщелочных габброидов, кварцевых монцонитов, гранодиоритов, лейкосиенитов (1.8 млрд лет); 10 – граниты, гранодиориты, кварцевые монцодиориты и др. (1.86–1.84 млрд лет); 11 – перидотиты, пироксениты, габбро (1.97 млрд лет); 11 – граниты, гранодиориты, щелочные граниты (2.65–2.5 млрд лет); 12 – архейские граниты (2.7–2.65 млрд лет); 13 – надвиг, разделяющий породы гранулит-гнейсовой области от более низкотемпературных пород (Мейерский надвиг); 14 – месторождения и проявления графитовых руд (1 – Ихала-3; 2 – Ликолампинское; 3 – Кайвомякское; 4 – Ихальское (I–II, IV–VII); 5 – Южно-Туоксиярвинское; 6 – Туоксиярвинское; 7 – Северо-Туоксиярвинское; 8 – Красный победитель; 9 – Кукколампинское; 10 – Теньярвинское; 11 – Романовская аномалия; 12 – Полвилампи; 13 – Майсульское; 14 – Руоярви-1; 15 – Иру-вуори; 16 – Салминское; 17 – Калаярвинское; 18 – Вези-Суон-селья; 19 – Суваоя; 20 – Гижозерское; 21 – Нинисельга; 22 – Панниельга; 23 – Киттельское; 24 – Хопунваара

В Западном Приладожье открыты основные графитовые руды метаморфогенного типа Ихальского рудного поля (рис. 2 под условным знаком 14, 1–4). Ихала–III открыта в 1971 г. геологами Карельской комплексной геологоразведочной экспедиции.

Оценка графитовых провинций Фенноскандинавского щита на основе технологической минералогии

В Норвегии добывается графитовая руда на единственном графитовом руднике Skaland на о. Senja. Установлено, что формирование графитовой минерализации в провинции Lofoten–Vesterålen связано с метаморфизмом гранулитовой фации, что является благоприятным фактором для образования высококачественного чешуйчатого графита [10, 11, 21].

Широким фронтом Геологическая служба Норвегии (NGU) осуществляла электромагнитные измерения с вертолета и наземные геофизические работы в районах, где прогнозировались графитовые руды [22]. Таким образом, на основе геофизической и геологической информации оценивался каждый участок с графитовой минерализацией, включая поисковое бурение. Важность месторождений и проявлений определялась по классам показателей запасов графита в руде (классы А, В, С, D, E) [15, 23].

Опыты по обогащению графитоносных линзообразных тел провинций Senja, Holandsfjord и Lofoten–Vesterålen показали, что из этой руды методом флотации двухстадийной очистки могут быть получены концентраты фракции +150 мкм с содержанием 98,1 % $C_{гр}$ при извлечении 90 % [22].

Результаты минералого-технологических исследований чешуйчатого графита отражают большой диапазон количественного содержания графита в породе (<1 % – 40 %). Обычные размеры чешуек составляют 200–300 мкм, максимальный размер – 3200 мкм.

На территории Швеции в районе Nunasvaaga распространены стратиформные горизонты черных сланцев, содержащие значительную графитовую минерализацию [19]. Здесь находится одно из самых высокосортных месторождений метаморфического графита в мире [24].

В центральной Швеции исследовались и частично разрабатывались руды нового рудного графитового поля Wohna площадью 146,71 га (на рис. 2 показано знаком под номером 5), в котором, как указывалось выше, располагают-

ся перспективные проявления графитовых руд. К наиболее изученному объекту относится месторождение Kringel. В течение 1998 года компания Woxna Graphite AB на этом месторождении имела годовой выпуск продукции 12 000 тонн, но в конце 2001 года добыча была приостановлена в результате падения цен на графит и обогатительная фабрика недалеко от города Эдсбюн была закрыта. Сведения по оценке месторождений графита Швеции даны в отчете [16].

В настоящее время Woxna Graphite AB, как дочерняя компания Leading Edge Material Corp (LEM), возродила проект «Woxna» на принципах циркулярной экономики. Проведены укрупненные лабораторные испытания по переработке графитовых руд по отобраным пробам на месторождении Kringel. Технологические испытания включали флотацию графита с замкнутым циклом, обезвоживание, обогащение флотационных концентратов путем сферонизации. На завершающей стадии получены результаты по гидрометаллургической и пирометаллургической обработке графитовых руд [25].

С целью получения конечного продукта осуществляются такие операции как микронизация для проклейки, сферонизация по получению «скрученных» чешуек графита с последующей термической очисткой; покрытие очищенных сферонизированных чешуек дополнительным углеродом для получения графита, подходящего для использования в анодах аккумуляторов. Ввод новых технологических линий на действующей обогатительной фабрике Woxna должны обеспечить требуемую производительность. В схему измельчения графита включается стержневая мельница, склад дробленого материала и классификатор стержневой мельницы. Флотационная схема основана на последних испытаниях, проведенных компанией BGRIMM. Схемы обезвоживания и упаковки в мешки остаются прежними; добавлены обезвоживающие циклоны во флотационном контуре для повышения плотности суспензии и сепаратор для очистки перелива циклонов. Исключены классификационные грохоты для сухого графита. Фабрика спроектирована с включением измельчения и сферонизации графитового флотационного концентрата с последующей термической очисткой. Мелкие частицы после сферонизации снова измельчаются для получения сверхтонкого графита [25].

Графитовый проект Woxna содержит в себе перспективный план освоения четырех месторождений графита (Kringel, Gropabo, Mattsmyra

и Mansberg). Пока только графиты месторождения Kringel включены в проект как эксплуатационный объект.

В Финляндии проводятся исследования по проекту «Аккумуляторные минералы» (2019–2022), в рамках которого дается оценка минерального потенциала с акцентом на чешуйчатый графит, кобальт и литий. По результатам проекта можно судить, что перспективной на графит определяется площадь в поясе сланцев Саво в центральной Финляндии. Здесь выявлено значительное содержание графитовой минерализации в слюдяных сланцах и полевошпатовых биотитовых гнейсах [6, 7].

Для анализа чешуйчатого графита использовались сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия и рамановская спектроскопия, которые показали, что графит практически без дефектов, высокого качества [8, 9].

Чешуйчатая разновидность графита является наиболее распространенной в сланцах проявлений Rautalampi и Käyrsuo. Размер графитовых чешуек варьирует от 50 до 1600 мкм, при этом длина большинства из них составляет от 200 до 500 мкм. Соотношение между длинной и короткой осями большинства чешуек находится в диапазоне от 2 до 5. Среднее содержание углерода в графите составляло 12.5% при общем содержании серы <3.0%. Графитовый концентрат содержит некоторые минеральные примеси, что затрудняет его очистку с использованием стандартного метода флотации, среди которых кварц и сульфиды относятся к главным минералам-примесям в исследуемой графитовой руде. Несмотря на это для получения графита высокой чистоты из мелкозернистого графитового концентрата были использованы технологии щелочного обжига и кислотного выщелачивания, чтобы улучшить качество графита в рудах Rautalampi и Käyrsuo с целью получения графитового концентрата сверхвысокой чистоты (99,95%) при измельчении до размера частиц <30 мкм, что соответствует требованиям для производства литий-ионных батарей.

Исследователи Геологической службы Финляндии успешно использовали метод рамановской спектроскопии для оценки степени кристалличности и пиковой метаморфической температуры графита месторождений Rautalampi и Käyrsuo [7]. Основываясь на отношении интенсивностей D1-полосы к G-полосе на рамановских спектрах [14] с использованием

известного рамановского геотермометра [8] было показано, что температура образования упорядоченных графитовых чешуек в Rautalampi и Käyrsuo варьировала в диапазоне 470–590 °C, а неупорядоченных – от 400 до 440 °C.

Графитовые руды Ихальского объекта содержат, главным образом, мелкочешуйчатую разновидность графита (рис. 4). В этом графите с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA II LSH (Tescan) с энерго-дисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) обнаружены минералы-примеси.

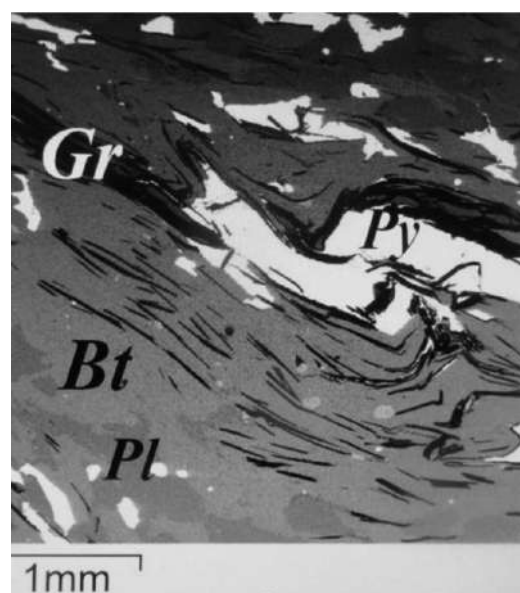


Рис. 3. СЭМ изображение чешуйчатого графита (Gr) в графитовой руде месторождения Ихала-3.

Bt – биотит, Pl – плагиоклаз, Py – пирит

Руды оценены на обогатимость в границах Ихала-3 на стадии поисково-оценочных работ. Испытания выполнялись в Уралмеханобр, ВНИИнеруд и в ИГ КарНЦ РАН [1]. Запасы определены в трех блоках в количестве 81.4 млн т руды до глубины 120 м при среднем содержании углерода 3.01% (борт 2%). Прогнозные ресурсы категории P₁ оценены в 124 млн тонн до глубины 170 м при среднем содержании углерода 3.07% [4].

Термические эффекты графитовых руд изучали методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на синхронном термическом анализаторе STA 449 F1 Jupiter на образцах месторождения Ихала-3 (рис. 4 а, б). ДТА показал одновременное присутствие в отдельных пробах скрытокристаллического и чешуйчатого графита, о чем свидетельствуют раздвоенные экзотермические эффекты в области 820–880 °C.

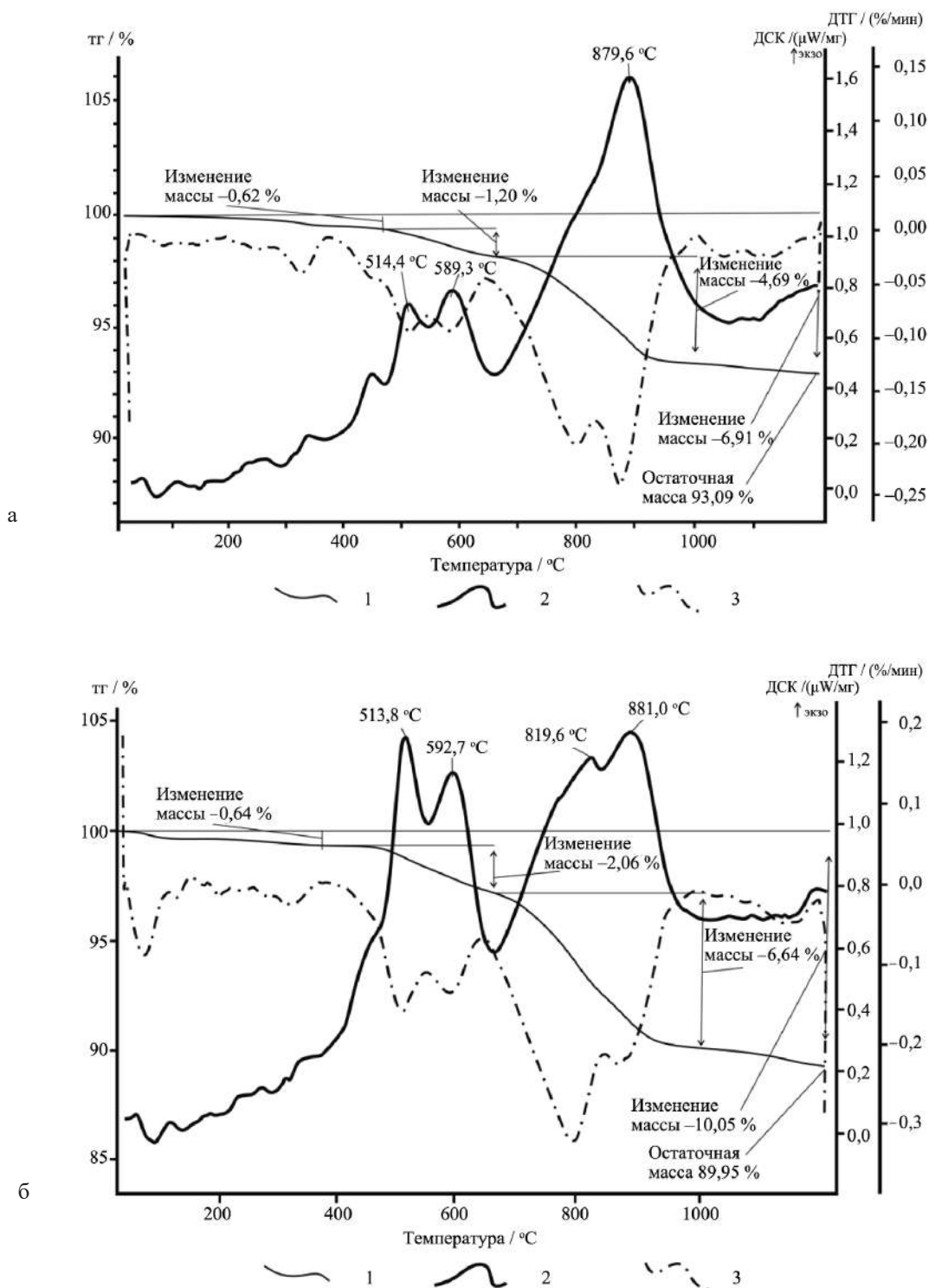


Рис. 4. Термограммы графитовых руд месторождения Ихала-3.

а – кварц-биотит-плагиоклазовый гнейс, б – амфибол-биотит-плагиоклазовый гнейс

1 – термогравиметрический анализ (ТГ); 2 – дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК); 3 – дифференциальный термогравиметрический анализ (ДТГ)

Присутствие хлорита отмечается практически для всех типов пород в виде эндотермического эффекта, связанного с его дегидратацией в интервале 660–670 °C. Для сульфидов отме-

чаются четко выраженные экзотермические пики 515–600 °C, обусловленные окислением сульфидов при нагревании в окислительной атмосфере.

Заключение

Таким образом, в настоящее время графит вызывает повышенный интерес в связи с резкой динамикой спроса на промышленные концентраты графита. В этом отношении месторождения и проявления чешуйчатого графита Фенноскандинавского щита переживают второе рождение за счет важной потенциальной базы, внимание к которой стало актуальным на примере динамики развития и оценки чешуйчатого графита компаниями в Норвегии,

Финляндии и Швеции. Учитывая потребность в суперчистом чешуйчатом графите, оценка графита связана прямым образом с приложением к исследованиям современных аналитических методов. На основе принципов народно-хозяйственной значимости и аналогии нельзя сбрасывать со счетов минерально-сырьевой потенциал восточной части Фенноскандинавского щита (Карело-Кольский регион) [5].

Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН, тема НИР № 121040600173-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бискэ Н. С. Графитовое оруденение Сев. Приладожья (геологические и генетические особенности). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1987. 172 с.
2. Борисов И. В. История горного дела Сев. Приладожья. XVII в. – 1939 г. Сортавала, 2009. http://ladoga-online.ru/portal/libr/book_08.html.
3. Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. 435 с.
4. Недра Северо-Запада Российской Федерации / Коровкин В. А., Турылева Л. В., Руденко Д. Г., Журавлев В. А., Ключникова Г. Н. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2003. 520 с.
5. Щипцов В. В. Графитовые рудные районы Фенноскандинавского щита // Труды КарНЦ РАН. 2022. № 2. С. 33–49.
6. Al-Ani T., Ahtola T. & Kuusela J. Prospecting and exploration of flake graphite occurrences in Central and Southern Finland // GTK research Report 24. 2018. 28 p.
7. Al-Ani T., Leinonen S., Ahtola T., Salvador D. High-Grade Flake Graphite Deposits in Metamorphic Schist Belt, Central Finland – Mineralogy and Beneficiation of Graphite for Lithium-Ion Battery Applications // Minerals. 2020. 10(8) 680. 16.
8. Beyssac O., Rumble D. Graphitic carbon: a ubiquitous, diverse and useful geomaterial // Elements. 2014. № 10. P. 415–420.
9. Beyssac O., Chopin C., Rouzaud J.-N. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer // Journal of Metamorphic Geology. 2002. 20(9). P. 859–871.
10. Corfu F. Multistage metamorphic evolution and nature of the amphibolite-granulite facies transition in Lofoten–Vesterålen, Norway, revealed by U–Pb in accessory minerals // Chemical Geology. 2007. V. 241. P. 108–128.
11. Engvik A. K., Davidsen B., Coint N., Lutro O., Tveten E., Schiellerup H. High-grade metamorphism of the Archean to Palaeoproterozoic gneiss complex in Vesterålen, North Norway // 32nd Geological Winter Meeting Helsinki, Bulletin of the Geological Society of Finland, special issue. 2000. P. 153–154.
12. Engvik A. K., Gautneb H., Knežević Solberg J., Rønning J. S. & Austrheim H. High-grade formation of graphite in Vesterålen, northern Norway, and its consequences for petrophysical properties of the lower continental crust // NGF Abstracts and Proceedings of 34th Nordic Geological Winter Meeting. 2020. P. 56.
13. European Commission Study on the review of the list of critical raw materials. Executive summary / Written by Deloitte Sustainability British Geological Survey, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. 2017. 9 p.
14. Ferrari A. C., Meyer J. C., Scardaci V., et al. Raman Spectrum of Graphene and Graphene Layers // Phys. Rev. Lett. 2006. 97. 187401. Gautneb H., Wanvik J. E. The graphite schists in the Gjerstad-Kragere area and their graphite potential, Southern Norway // Report NGU no 2016.10. 2016.
15. Halberg A. & Reginiussen H. Mapping of innovation-critical metals and minerals // SGU report 2019:20. Uppsala: 2019.
16. Keeling J. Graphite: properties, uses and South Australian resources // MESA J. 2017, 84. 41 p.
17. Leading Edge Materials. Woxna graphite. 2018. <https://leadingedgematerials.com/woxna-graphite/> / Accessed 27 October 2019.
18. Lynch E., Hellström F., Huhma H., et al. Geology, lithostratigraphy and petrogenesis of c. 2.14 Ga greenstones in the Nunasvaara and Masugnsbyn areas, northernmost Sweden // Geology of the Northern Norrbotten ore province, Northern Sweden. 2018. GSS. 77 p.
19. Mineral deposits of Finland / eds by W. Maier, R. Lahntien and H. O. Brien. 2015, Elsevier Inc. 791 p.
20. Palosaari J., Latonen R.-M., Smått J.-H., Blomquist R., Eklund O. High-quality flake graphite occurrences in a high-grade metamorphic region in Sortland, Vesterålen, Northern Norway // Norwegian Journal of Geology. 2016. 96. P. 19–26.
21. Rodionov A., Ofstad F., Stampolidis A. & Tassis G. Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical survey at Langøya in Vesterålen // Nordland. NGU report. 2013. 044. 2013.

22. Rønning J. S., Gautneb H., Larsen B. E., Knežević J., Baranwal V. C., Elvebakk H., Gellein J., Ofstad F., Brønner M. Geophysical and geological investigations of graphite occurrences in Vesterålen and Lofoten, Northern Norway 2017 // NGU report 2018.011. Geological Survey of Norway. 2018.

23. Scogings A., Chesters J., Shaw B. Assessing graphite projects on credentials // Industrial Minerals Magazine, August 2015. P. 50–55.

24. Stinton C., Holmström H., Gosselin M., Reed G. Woxna Graphite // Technical Report-Project: 112. 2021. Woxna Graphite AB. 354 p.

DOI: 10.17076/tm14_33

РОЛЬ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОЛОВЯННЫХ РУД

Чикишева Т. А.^{1,2,3}, Комарова А. Г.^{1,3}, Прокопьев С. А.^{1,2}, Прокопьев Е. С.^{1,2}

¹ ООО НПК «Спирит», Иркутск

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³ Иркутский государственный университет, Иркутск

Введение

В соответствии со Стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р, олово относится к полезным ископаемым первой группы, сырьевая база которых достаточна для обеспечения потребностей экономики в долгосрочной перспективе при любых сценариях ее развития и не требует проведения активных геологоразведочных работ, направленных на ее воспроизводство. Однако, степень освоенности фонда недр сравнительно низкая, что обусловлено слабой развитостью металлургического сектора оловянной промышленности и отсутствием заинтересованных инвесторов. Внутренний спрос на металлическое олово, его сплавы и изделия из олова низкий, тем не менее, он в значительной степени обеспечивается за счет импортных поставок [7]. Однако, для необходимости импорта нет оснований, основная причина в том, что на обогатительных фабриках не применяется технология комплексного извлечения металлов, которая бы сделала переработку оловянных руд рентабельной [5].

Между тем Россия располагает одной из крупнейших сырьевых баз олова в мире, которая могла бы обеспечить стране высокие позиции среди оловопроизводящих государств. Однако уровень ее вовлеченности в эксплуатацию низкий. В результате на долю России приходится менее 1 % мирового производства металла [7]. Добыча олова в России на текущий период ведётся на 4 коренных место-

рождениях в двух субъектах: Правоурмийское и Фестивальное в Хабаровском крае, Южное и Забытое – в Приморском крае. Оловорудные объекты, как правило, являются комплексными – помимо олова при разработке таких месторождений получают вольфрамовый концентрат, а в настоящее время ведутся исследования по возможности получения медного концентрата. Кроме того, оловорудные месторождения содержат запасы попутных редких и стратегических металлов, таких, как висмут, серебро, сурьма и индий. При современном подходе к освоению месторождений упор делается на рациональную и комплексную его переработку с последующим использованием отходов горно-обогатительного производства. Однако, чтобы реализовать такой подход на практике требуется всестороннее и очень детальное изучение исходного сырья методами технологической минералогии, которая в настоящее время занимает позицию самостоятельной дисциплины, служащей мостом между геологией и технологией переработки минерального сырья с целью получения конечных продуктов [10]. Рассмотрим важность проведения таких исследований на примере комплексной руды Правоурмийского месторождения.

Материалы и методы

Исходным материалом для проведения исследований являлись технологические пробы руды с разных горизонтов Правоурмийского месторождения и продукты её обогащения. Минералогические исследования выполнялись

в минералогическом отделе ООО НПК «Спирит» в соответствии с нормативно-методическими документами Научного совета по минералогическим методам исследований (НСОММИ) № 162 «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дроблёных проб» и № 194 «Минераграфическое изучение руд» [4, 6] с применением следующих методов исследования вещественного состава: оптическая микроскопия (петрографический, минераграфический и оптико-минералогический анализы), рентгенографический анализ, растровая электронная микроскопия.

Краткая геологическая характеристика месторождения

В геологическом строении Баджалского оловорудного района участвуют осадочные породы палеозойско-мезозойского возраста и ранне-позднемиловые магматические образования. Район расположен в пределах одноименной вулканической зоны, занимающей центральную часть Хингано-Охотского вулканоплутонического пояса и развивавшейся на сочленении Буреинского кристаллического массива с Сихотэ-Алинской складчатой системой. Рудное поле месторождения Правоурмийское шириной 1.0–1.5 км занимает центральную часть Верхнеурмийского рудного узла. Основными продуктивными образованиями рудной зоны являются кварц-топазовые грейзены. На месторождении выделяются 6 стадий минерализации, объединённых в три этапа: безоловянный дорудный молибденовый, продуктивный оловорудный грейзеновый и пострудный антимонитовый [2]. Месторождение относится к грейзе-

новому промышленному типу, запасы по категории C_2 – 22,9 тыс. тонн, $A+B+C_1$ – 51 тыс. тонн, содержание олова 1.16% [7].

Результаты и обсуждение

Изучение руды методами оптической микроскопии. Породы рудной зоны представлены в разной степени изменёнными в процессе грейзенизации вулканитами кислого состава. Структура разноминеральная, от тонко- до среднезернистой, участками порфировая. Рудная минерализация отмечается в виде прожилково-вкрапленных и гнездовидных выделений касситерита, минералов мышьяка (арсенопирита и лёллингита), вольфрамита, халькопирита и борнита. Руда представляет собой разноминеральный полиминеральный агрегат переменного состава, состоящий из кварца, топаза, турмалина, а также полевых шпатов, флюорита, серицита, биотита, касситерита, рудных минералов (рис. 1).

Минералом-концентратором олова выступает касситерит, являющийся пока единственным из всех минералов олова, используемым отечественной промышленностью. При проведении минераграфических исследований выявлена ещё одна форма нахождения олова – сульфостаннаты железа и олова. Минералы этой группы представлены преимущественно станнином, в подчинённом количестве присутствуют моусонит и станноидит. Все они находятся в структурах распада твёрдых растворов с халькопиритом и борнитом, тем самым образуя очень тонкие микронные прорастания.

Важнейшей технологической характеристикой этого этапа исследований выступает размер

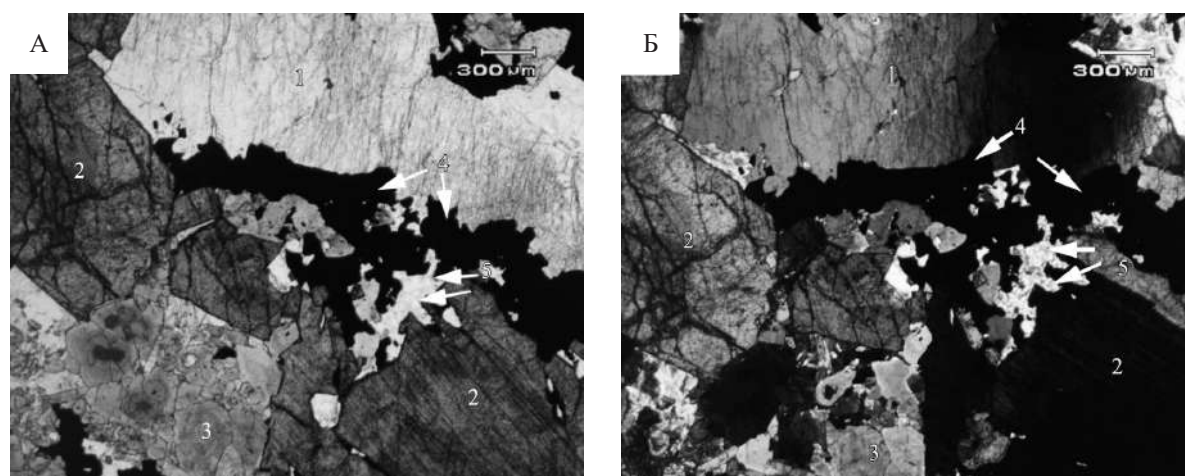


Рис. 1. Микрофотография грейзена. Кристаллически-зернистый топаз (1) в тесном срастании с касситеритом (2), турмалином (3), рудным минералом (4) и серицитом (5). Прозрачный шлиф.

А – николи ||, Б – николи Х

естественной вкрапленности главного минерала-концентратора олова – касситерита. Размеры его отдельных зёрен варьируются в диапазоне 0.01–10.0 мм, размеры скоплений иногда стремятся к 50 мм, при этом зёрна касситерита часто катализированы, что приводит к более быстрому их разрушению и ошламованию в процессе рудоподготовки.

Минералогическим анализом установлено, что в основной массе дроблёная руда состоит из породообразующих минералов и их сростаний (обломки пород). Главными породообразующими минералами являются кварц и топаз, второстепенным – турмалин. Рудные минералы: касситерит, вольфрамит, арсенопирит, лёллингит и, в подчинённом количестве, сульфиды меди (халькопирит, борнит, халькозин). Акцессорные минералы представлены цирконом, титанитом, рутилом и монацитом. Вторичными минералами выступают гидроксиды железа, плёнки скородита по арсенопириту и лёллингиту, малахит и ковеллин по минералам меди.

В пробах дроблёной руды касситерит визуализируется в виде обломков неправильной формы, иногда с сохранившимися гранями кристаллов. Окраска зёрен неравномерная, пятнистая, иногда зональная от тёмно-коричневого до бледно-жёлтых цветов. Касситерит отмечается как в виде свободных зёрен, так и в сростках различного качества. Поскольку касситерит имеет довольно высокую плотность (6.04–7.12 г/см³) традиционной технологией получения его концентратов является гравитационное обогащение. Сростки касситерита с породообразующими минералами

при проведении гравитационного обогащения как правило распределяются в промпродуктовую зону и для его извлечения из них потребуется проведение дополнительных доводочных операций с предварительным доизмельчением.

Однако, помимо касситерита, в руде содержатся и другие минералы с высокой плотностью, например, вольфрамит и сульфиды. Вольфрамит выступает попутным ценным компонентом и вольфрамовый концентрат получается путём проведения электромагнитной сепарации. Сульфиды удаляются флотацией, однако пенные продукты отличаются повышенными содержаниями олова, что связано с наличием в них станнина – сульфидной формы нахождения олова, поскольку станнин по своим флотационным свойствам очень близок к халькопириту и борниту, с которыми он находится в тесной природной ассоциации.

Исследования методом растровой электронной микроскопии. Исследования показали наличие в крупных зёрнах касситерита включений топаза, флюорита, рутила (рис. 2 А, Б). При измельчении таких зёрен будет образовано большое количество сростков, в том числе закрытого типа. Иногда в зёрнах касситерита наблюдаются участки замещения его станнином (рис. 2 Б). По составам проанализированных зёрен можно сказать, что состав касситерита Правурмийского месторождения близок к стехиометрическому и содержит небольшое количество типичных для него изоморфных примесей тантала и железа. Содержание олова в касситерите варьируется в диапазоне 78.4–78.9%.

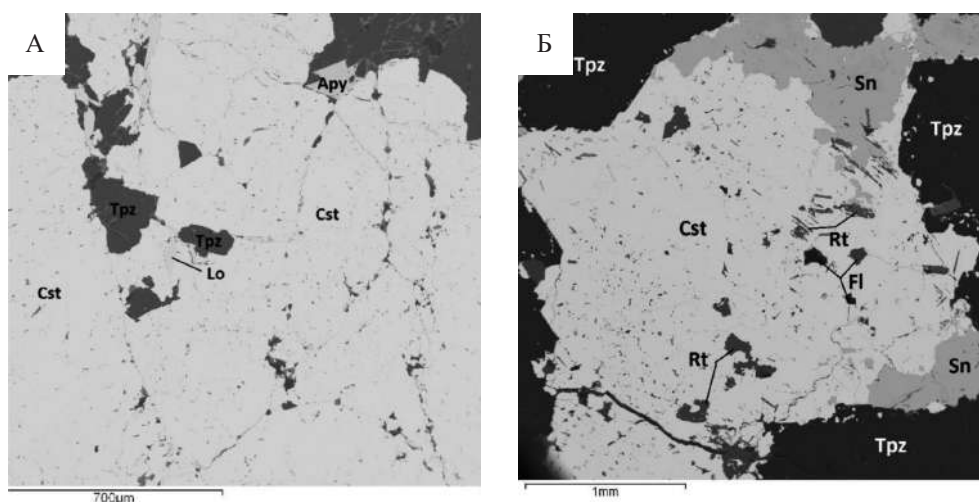


Рис. 2. Катаклазированные зёрна касситерита с включениями других минералов

Cst – касситерит, Sn – станнин, Tpz – топаз, Rt – рутил, Fl – флюорит, Apy – арсенопирит, Lo – лёллингит. Изображения в обратно рассеянных электронах

Обнаружены также минералы редких элементов – висмута, серебра, сурьмы и индия. Самородный висмут образует эмульсионную вкрапленность в борните. Виттихенит образуется на контакте зёрен самородного висмута и борнита (рис. 3 А). Каймы обрастания виттихенита возникают при реакционном взаимодействии эмульсионных выделений самородного висмута с борнитом [11]. Самородный висмут может иметь примесь серебра, что в исследуемых образцах отмечено в единственном зерне (рис. 3 Б). Индий в образцах руды Правоурмийского месторождения установлен как в виде примеси в станнине и в халькопирите, так и в виде собственной минеральной формы – рокезита (CuInS_2). Рокезит относится к минералам группы халькопирита, тесно ассоциирует с самородным висмутом и виттихенитом и практически всегда встречается в одной ассоциации с ними (рис. 3 В, Г). Серебро выявлено в качестве примеси в тетраэдрите и, в установленном

впервые в рудах данного месторождения, скиннерите. Серебросодержащий скиннерит (Cu_3SbS_3) сходен с виттихенитом (Cu_3BiS_3), который является его висмутовым аналогом [12]. Скиннерит образует ксеноморфные выделения в халькопирите и станнине (рис. 3 Д, Е). Кроме этого, в рудах отмечены фазы переменного состава, содержащие Cu, Fe, Ag, Sn, Sb и S [9].

Богатая сульфидная минерализация в составе оловянных руд не оценивалась и безвозвратно терялась при отработке месторождений [3], при этом содержания редких металлов в руде позволяют говорить о перспективах их извлечения. Запасы меди в рудах Правоурмийского месторождения составляют 165 тыс. т [8]. Нахождение в них сульфидных минералов олова и редких минералов висмута, сурьмы, серебра и индия могут сыграть ключевую роль в повышении стоимости медно-сульфидного концентрата. Массовые доли висмута и сурьмы в исходных рудах колеблются в пре-

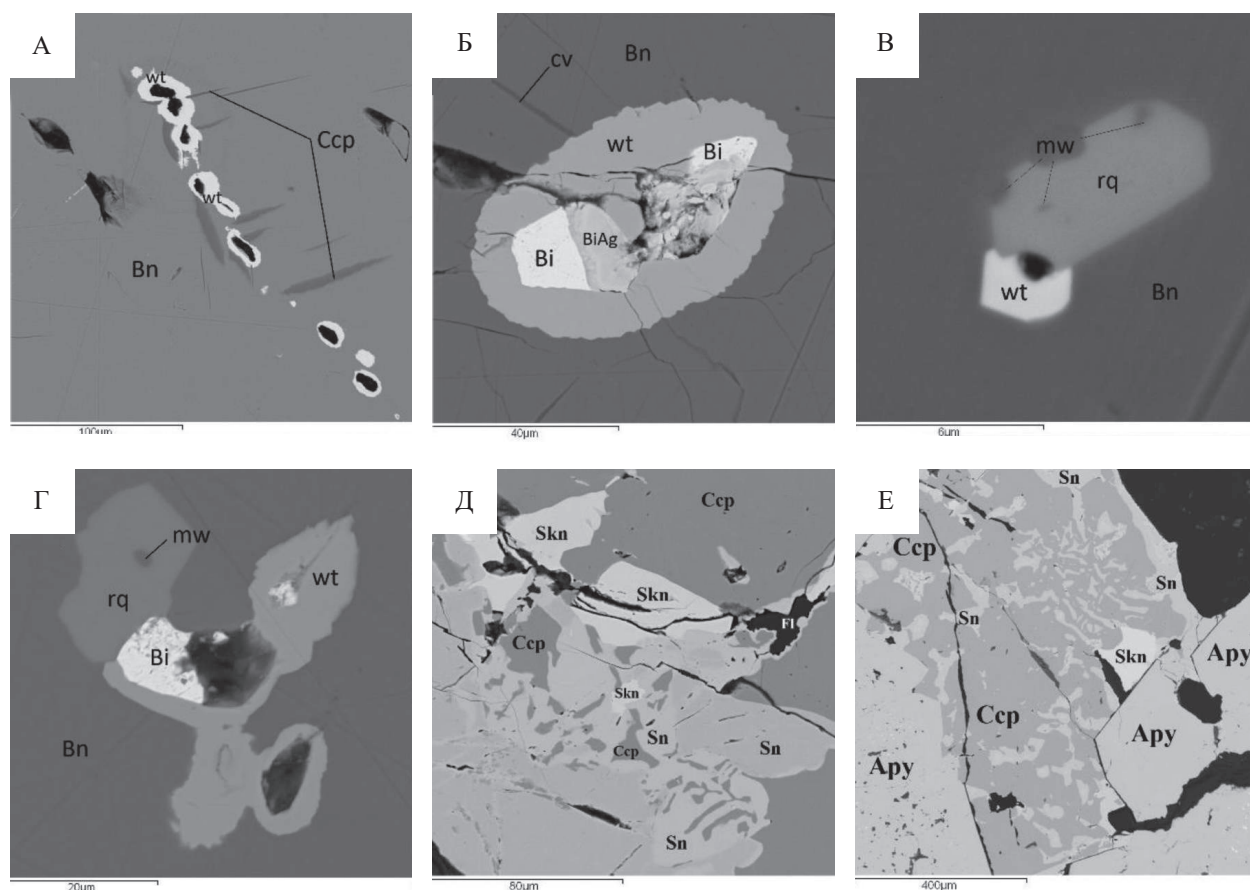


Рис. 3. А – виттихенит – каймы обрастания вокруг эмульсионных вкраплений самородного висмута (пустоты чёрного цвета), Б – самородный висмут и висмут с примесью серебра с каймой обрастания виттихенитом в борните с ковеллином, В – зерно рокезита с включениями моусонита в ассоциации с виттихенитом в борните, Г – рокезит с включением моусонита на контакте с виттихенитом и самородным висмутом в борните, Д – Скиннерит в сростании с халькопиритом и станнином, Е – скиннерит в сростании с халькопиритом и станнином на контакте с арсенопиритом. Изображения в обратно рассеянных электронах

делах первых сотых долей процента. Содержания редких металлов в руде месторождения составляют: серебро от 2 до 129 г/т, индий – от 5 до 130 г/т, среднее 55 г/т по данным [1] и 10–130 г/т, среднее 55 г/т, подсчитанные запасы индия для всего месторождения составляют 400 т [8].

Выводы

В ближайшей перспективе добыча олова из российских недр может вырасти в 2–3 раза. В 2020 году статус подготавливаемых к освоению имели три природных объекта: россыпь ручья Тирехтах, и оловорудное Депутатское месторождение в республике Саха (Якутия), штокерки Пыркакайского рудного узла в Чукотском АО [7]. Как правило, оловорудные месторождения являются комплексным сырьём со сложными характеристиками, что необходимо учитывать при разработке сложных многостадийных технологий их обогащения. Исследования подобных объектов современными прецизионными методами указывают нам на их трудную обогатимость: все они имеют полиминеральный переменный состав, несколько форм нахождения ценного компонен-

та (касситерит и сульфостаннаты железа и меди), попутно извлекаемые компоненты (вольфрам и медь), сложные текстурно-структурные особенности руды, обусловленные совместным присутствием касситерита, сульфидов и породообразующих минералов разной формы и размеров в тесной ассоциации друг с другом, низкая контрастность некоторых физических свойств минералов руды. Богатая полиметалльная сульфидная минерализация оловянных руд безусловно повышает их ценность. Современный подход к освоению месторождений предполагает комплексное извлечение всех ценных компонентов минерального сырья, что в свою очередь требует разработки сложных многостадийных схем обогащения и металлургического передела.

На основании всего вышесказанного можно уверенно заявить, что комплексная переработка таких руд невозможна без проведения их изучения методами технологической минералогии на всех этапах освоения месторождения – от геологоразведочных работ и минералого-технологического картирования до металлургического передела полученных концентратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаськов И. В., Владимиров А. Г., Ханчук А. И., Павлова Г. А., Гвоздев В. И. Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока России // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 1. С. 62–74.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / под ред. А. И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 2. С. 573–981.
3. Кокорин А. М., Кокорина Д. К., Орехов А. А. Многометалльность и высокая продуктивность локальных рудно-магматических систем Сихотэ-Алиня (на примере Арсеньевского месторождения) // Тихоокеанская геология. 2008. № 2. Т. 27. С. 29–45.
4. Минераграфическое изучение руд: методические рекомендации № 194 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2018. 39 с.
5. Митрофанов Н. П. Геодинамические режимы в северо-западном секторе Тихоокеанского рудного пояса на рудном этапе формирования месторождений олова // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 24. № 1. С. 59–72.
6. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дроблёных проб: Методические рекомендации № 162 / Научный совет по методам минералогических исследований (НСОММИ). М.: ВИМС, 2012. 23 с.
7. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад / гл. ред. Е. И. Петров, Д. Д. Тетенькин. Государственные доклады – Минприроды России (mnr.gov.ru) (дата обращения 26.08.2022).
8. Павлова Г. Г., Владимиров А. Г., Гвоздев В. И., Коростелёв П. Г., Семеняк Б. И., Гоневчук В. Г., Тишин П. А. Индиенность олово-сульфидной минерализации в оловорудных месторождениях Дальнего Востока России // ДАН. 2016. Т. 471. № 1. С. 71–76.
9. Чикишева Т. А. Минералого-технологические характеристики руды Правоурмийского месторождения олова (Хабаровский край). Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. Иркутск, 2021. 20 с.
10. Щипцов В. В., Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И. Технологическая минералогия во всем пространстве // Труды КарНЦ РАН. 2021. № 10. С. 44–66.
11. Amcoff Orjan, Nysten Per Mechanism of formation of wittichenite rims around native bismuth in chalcocite and bornite from Langban, Sweden // Geol. foren. Stockholm forhandl. 1990. Vol. 112. N 1. P. 45–50.
12. Makovicky E., Tonci Balic-Zunic. The crystal structure of skinnerite, $P2_1/c-Cu_3SbS_3$, from powder data // Canadian Mineralogy. 1995. Vol. 33. N 3. С. 655–663.

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ

Левченко Е. Н.

ФГБУ ИМГРЭ, Москва

Основные группы редких металлов являются стратегическими и, одновременно, дефицитными металлами для российской промышленности. Редкие металлы (РМ) и их соединения, благодаря уникальным свойствам, играют ключевую роль в научно-техническом прогрессе. Россия по разведанным запасам редких металлов занимает ведущие места в мире. Государственным балансом запасов на территории Российской Федерации учтено 86 месторождений редких, в т. ч. редкоземельных металлов. В ряду промышленных типов важную роль играют тантало-ниобиевые и ниобий-редкоземельные месторождения. По состоянию на 01.01.2020 г. государственным балансом учтено 19 месторождений, в т. ч. 5 – в металлоносных корях выветривания и россыпях. Это Белозиминское, Томторское (уч. Буранный, Северный и Южный), месторождения в корях выветривания карбонатитов с пироксеном, пироксено-монацитовые латеритные коры выветривания месторождения Чуктукон, титаноносные россыпи в толще лейкоксено-кварцевых нефтеносных песчаников месторождения Ярега и техногенное золото-редкоземельное россыпное месторождение Центральная-Нижняя.

Отечественная минерально-сырьевая база редких металлов представлена преимущественно низкокачественными рудами, имеющими полиминеральный состав и сложные текстурно-структурные характеристики.

Это сырье обладает непостоянным химическим и минеральным составами, обусловленными присутствием нескольких рудных фаз, отличающихся переменным составом с широким диапазоном изоморфизма; радиоактивностью отдельных минералов; варьирующим гранулярным составом рудных минералов и их сложными морфометрическими характеристиками. Поэтому без глубокого минералогического изучения руд невозможно оценить их качество, обеспечить комплексную переработку, обосновать пути извлечения полезного компонента, оптимизировать технологический процесс путем направленного изменения свойств руды или минералов.

Особенно актуальным становятся минералогическое и технологическое исследование руд редкометалльных месторождений, промышленное освоение которых в ближайшие годы способно не только полностью удовлетворить потребность отечественной промышленности в редких металлах, но и выйти с самой разнообразной редкометалльной продукцией на мировой рынок.

С помощью приемов и методов технологической минералогии получены новые данные по особенностям минерального состава редкометалльных, в том числе редкоземельных руд кор выветривания, влияющие на их технологические свойства (качество получаемых продуктов).

Чуктуконское месторождение (Красноярский край) приурочено к одноименному куполу Чадобецкого поднятия. Чуктуконское рудное поле связано с латеритной корой выветривания карбонатитов [2]. Руда представлена преимущественно рыхлой, реже плотной, каменистой разновидностями. Большая его часть сформирована тонкодисперсными охрами железо-марганцевого состава, в которых в значительном количестве присутствуют барит, монацит, минералы группы крадаллита, церианит, Sr-, Ba-, Ce-пироксен. Ниобий-редкоземельные рудные тела располагаются в охристой зоне КВ карбонатитов – с ними связано 90–95 % запасов редких металлов.

В большинстве своем руды относятся к категории мелко-тонковкрапленных, нередко в них присутствуют тонкодисперсные системы полиминерального состава. Для руд типичен весьма сложный текстурный рисунок, обусловленный пространственным распределением минеральных агрегатов и развитием вторичных текстур. В формировании руд принимают участие более 20 минералов. Главными рудными компонентами по их ценности в рудах Чуктуконского месторождения являются редкоземельные металлы (РЗМ) – лантаноиды от лантана до лютеция и иттрий, образующие непрерывный изоморфный ряд в монаците, флоренсите, крадаллите; вторым по значимости является ниобий, в составе пироксена в его модификациях (барий-, стронцио-, цериопироксен).

Определенную ценность представляют марганец и железо. В пределах распространения рудного пласта Чуктуконского рудного поля наблюдаются значительные вариации в исходных пробах МТП

содержания ценных (РЗЭ, Mn, Nb, Y), попутных (Ti, R и др.) и породообразующих (Fe, Ca и др.) элементов, а так же основных минералов: пирохлора, монацита, группы крандаллита (табл.).

Таблица

Вариации содержаний значимых элементов в рудах Чуктуконского месторождения

	MnO	Fe ₂ O ₃	Nb	Sr	Ba	La	Ce	Nd	ΣРЗЭ
	мас. %		ppm						
минимум	2.66	28.1	0.25	0.10	0.85	0.15	0.22	0.10	0.42
максимум	16.5	64.0	1.47	0.76	3.13	1.30	2.22	0.99	3.68
среднее	9.62	44.9	0.81	0.51	2.06	0.77	1.36	0.59	2.24
коэффициент вариации	0.46	5.40	0.003	0.001	0.018	0.003	0.01	0.002	0.03

Рудные минералы тесно ассоциируют друг с другом и породообразующими фазами, образуют сложные по составу полиминеральные агрегаты, нередко отличающиеся высокой дисперсностью. В тонкодисперсных полиминеральных агрегатах гематит присутствует в тесной ассоциации с гетитом и минералами группы крандаллита. Скрытокристаллический гематит слагает основную массу каменистых гетит-гематитовых руд, развивается по гетиту, который в свою очередь развивается по пирохлору.

Пирохлор отмечается в виде тонкой вкрапленности, неравномерно распределен в руде. По данным рентгеноспектрального микроанализа в руде выделены следующие разновидности пирохлора: стронций-цериевый; барий-стронциевый; смешанный бариевый-стронций-цериевый. Пирохлор всех разновидностей является вторичным, образованным в результате гипергенного изменения первичного натрий-кальциевого пирохлора. Кристаллы обладают повышенной хрупкостью

и легко разрушаются при слабом механическом воздействии (рис. 1).

Монацит встречается в виде порошковатых масс и пористых агрегатов, сформированных зернами таблитчатой и удлиненно-призматической формы размером первые микрометры. Присутствует в тесной ассоциации с гидроксидами железа, которые образуют вокруг него оболочку. Монацит представлен в основном цериевой (Ce, La, Nd, Th)PO₄ и лантановой (La, Ce, Nd)PO₄ разновидностями, кроме того содержит Pr, Nd, Sm. Содержание суммы РЗЭ в исследованных монацитах 52–58%, Y₂O₃ от 0.9 до 1.8%. Выделяются области, представляющие собой агрегаты минералов микронных размеров гетита и горсейксита (рис. 2). Иногда в этих агрегатах встречается монацит размером десятки микрон (точки 1, 3, 4, 5). В агрегатном *горсейксите* содержатся BaO 10–11%, Ln₂O₃ 0.8–2% (точки 2, 6). Монацит и горсейксит встречаются также и в виде отдельных микровключений в гематите (точка 13).

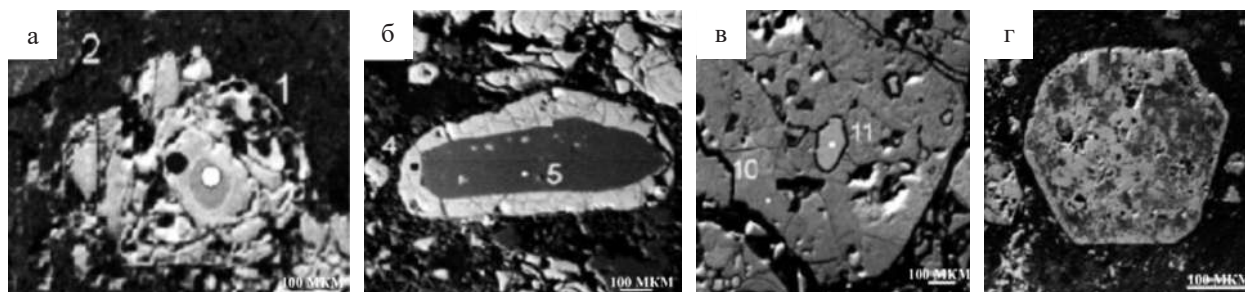


Рис. 1. Фазовая неоднородность пирохлоров по BSE изображениям и РСМА: а – реликтовый блок первичного пирохлора во вторичном новообразованном пирохлоре; б – скелетные формы пирохлора – гояцит – флоренсит во внутренней зоне, Sr-пирохлор во внешней зоне; в – идиоморфные, кубооктаэдрические кристаллы и замещения внутренних частей зерен пирохлора гояцит – флоренситом; г – микровключения монацита в кристалле пирохлора

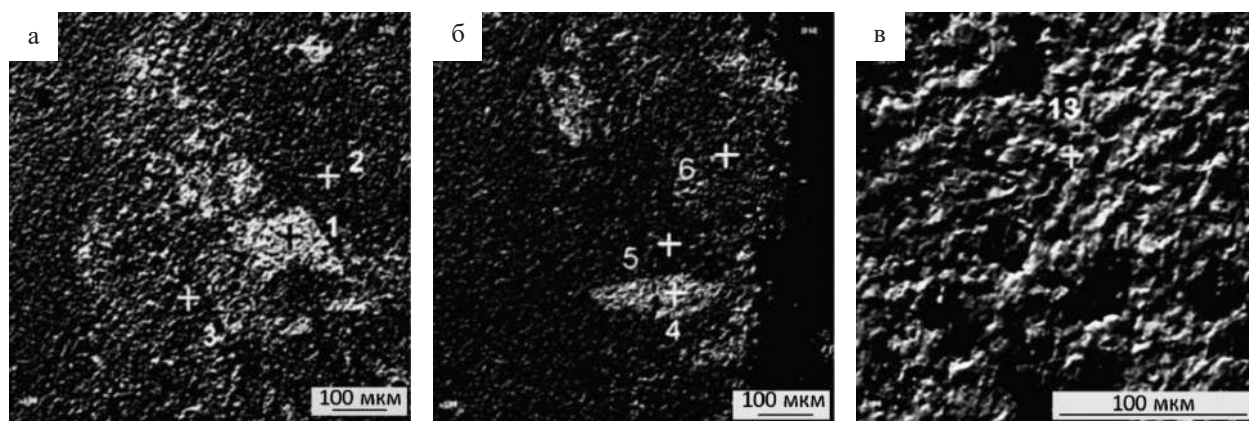


Рис. 2. BSE изображения монацита и горсейксита

Церианит присутствует в оолитовых и натечных бурых железняках в виде псевдоморфоз по монациту в ядрах оолитов, примазок на поверхности оолитов или на стенках трещин, заполненных натечными оксидами и гидроксидами железа и марганца (рис. 3). Помимо Fe_2O_3 оолиты заполнены флоренситом как цериевым, так и лантановым (точки 19, 20), а также монацитом-(La) (точки 39, 40) и церианитом (CeO_2). Церианит (точки 33, 34) с содержанием CeO_2 78.86 и 73.41 %, ThO_2 1.9 и 2.2 %) образован по трещинам внутреннего края каймы оолита, с другой стороны церианит (точки 41, 42) развивался по гидроокислу Fe и Mn (точки 29, 30).

Церианит, по-видимому, относится к специфическим минералам приповерхностных участков коры выветривания, в том числе бурых железняков, которые формируются в условиях повышенного кислородного потенциала на контакте кор выветривания с земной атмосферой. В этих условиях происходит окисление Ce^{3+} до Ce^{4+} , последний имеет гораздо меньшую величину ионного

радиуса и выделяется в самостоятельную селективную цериевую фазу. Лантановый состав РЗЭ в монаците, анализируемом с церианитом, в условиях сохранения прежнего состава РЗЭ в породе играет компенсирующую роль.

Минералы группы крандаллита имеют общую формулу $\text{AB}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$ и включают (AB_3): горсейксит (BaAl_3), гойяцит (SrAl_3), флоренсит (CeAl_3) и крандаллит (CaAl_3). Совместно с гетитом и каолинитом они слагают тонкодисперсную основную массу каолинит-гетитовых руд, в меньшей степени – гетитовых руд, образуют гнездовидные скопления в гетит-гематитовых рудах. Присутствуют в виде рассеянных тонкокристаллических выделений и сплошных тонкозернистых агрегатов. Минералы группы крандаллита отличаются преимущественно цериевым составом, содержание церия 13.51–19.86 %. Флоренсит и другие минералы группы крандаллита, так же как и монацит, являются характерными минералами как латеритных охр, так и развивающихся на их поверхности бурых железняков.

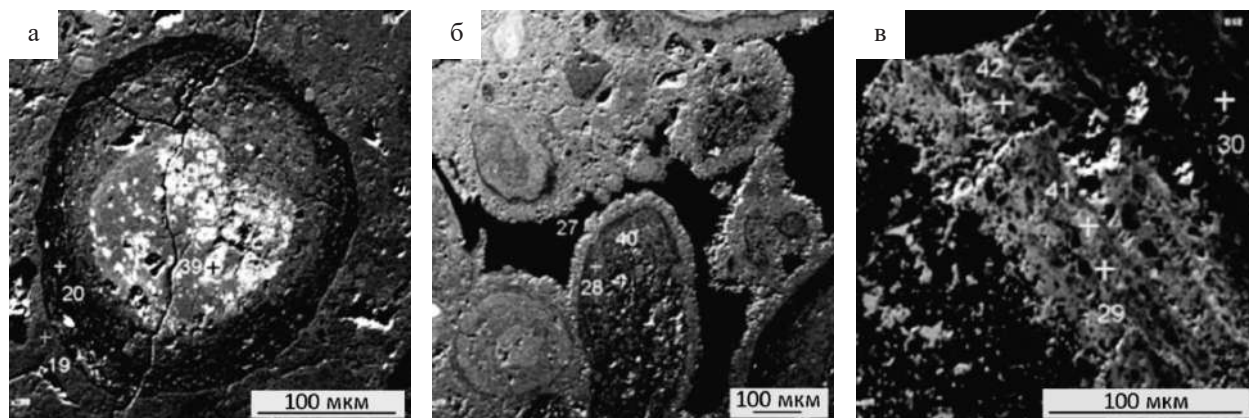


Рис. 3. BSE изображение церианита CeO_2 , образованного: а, б – по трещинам внутреннего края каймы оолита; в – по гидроокислу железа и марганца

На рисунке 4 представлены карта распределения фаз поверхности образца 20/93 аншлифа (А), а также растровое изображение распределения в этой области горсейксита и монацита (Б), соответственно. Рисунок позволяет получить представление не только о минеральном составе латеритных охр, но также о структуре породы, морфологии ее минералов и особенностях их распределения.

Природные особенности пироксид-монацит-гетитовых руд Чукотского рудного поля и полезных минералов: высокая дисперсность минералов и их тесные сростания с гидроксидами железа, с каолинитом и между собой, сложные типы коррозионных сростаний пироксидов с гидроксидами железа, повышенная хрупкость вторичного пироксидов, склонность к переизмельчению обуславливают невозможность их обогащения механическими методами. Комплексное извлечение ценных компонентов из этих руд возможно только гидрометаллургическими методами обогащения [5].

Основные проблемы освоения крупных комплексных редкометалльных объектов:

1. Практически все редкоземельные месторождения с разведанными запасами расположены в труднодоступных районах со слаборазвитой инфраструктурой, что существенно понижает перспективы их освоения и отодвигает ввод в эксплуатацию подчас на значительный срок.

2. Отсутствие мощностей по переработке редкоземельных и редкометалльных концентратов до конечной товарной продукции

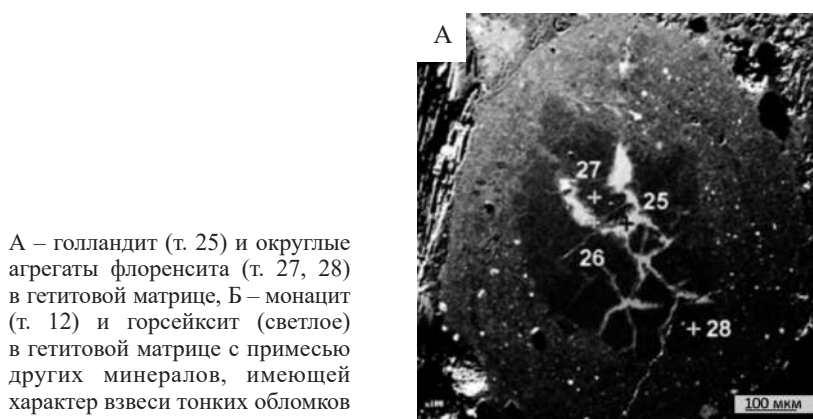
3. Комплексный состав руд месторождений, возможность реализации всей товарной продукции в полном объеме.

Одним из потенциальных источников иттрия и тяжелых лантаноидов в России могут стать

руды в глинистых корах выветривания Урала на территории Свердловской, Челябинской и Оренбургской областей и аргеллизиты Павловской площади Приморья.

РЗМ в рудах кор выветривания Урала находятся в четырех формах: в реликтовых минералах субстрата – монаците и ксенотиме, нерастворимых в кислотах и присутствующих в единичных мелких зернах; в новообразованных гипергенных минералах – рабдофаните, черчите, флоренсите и др.; предположительно, в форме пленок вторичных фосфатов на поверхности глинистых минералов и гидроксидов железа и марганца; на долю вторичных фосфатов, зернистых и пленочных, приходится около 80% суммарного количества $\sum TR_2O_3 + Y_2O_3$; в каолините и гидроксидах (хлоритоиды, гидрослюда) железа и марганца в сорбированном виде [1]. Технология переработки руд представляется достаточно простой, допускающей, в том числе, применение прогрессивного процесса кучного выщелачивания. Установлено, что оптимальным реагентом для перевода РЗЭ в раствор является соляная кислота. Предварительные лабораторно-технологические исследования показали возможность извлечения суммы РЗЭ в раствор до 80%.

Локализованные в результате поисковых работ на территории Приморья (Павловская площадь) редкоземельные объекты характеризуются компактностью и легкой обогатимостью, близостью к объектам транспортной инфраструктуры. На сегодняшний день здесь известны Абрамовское и Бойковское иттриевоземельные рудопроявления. Первое локализуется в аргиллизированных брекчиях и базитовых дайках, прорывающих раннекембрийские углеродисто-кремнистые сланцы лузановской свиты, второе – в аргиллизированных дайках трахибазальтов в палеозойских



А – голландит (т. 25) и округлые агрегаты флоренсита (т. 27, 28) в гетитовой матрице, Б – монацит (т. 12) и горсейксит (светлое) в гетитовой матрице с примесью других минералов, имеющей характер взвеси тонких обломков

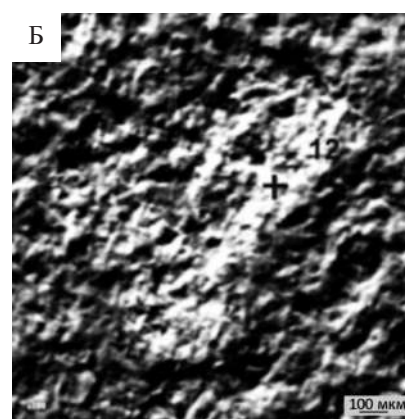


Рис. 4. Карта распределения фаз поверхности образцов (растровое изображение)

гранитах [7]. РЗЭ в рудах присутствуют в виде собственных минералов, представленных редкими водными карбонатами иттрия (кимураит, локкаит) и легких лантаноидов (лантанит), а также сорбированными формами на поверхности глинистых минералов [6]. Содержания РЗЭ в рудных телах Абрамовского рудопроявления от 0.05 до 1.4%, в том числе иттрия – от 0.025 до 1.02%. По содержанию Y эти руды богаче известных китайских иттриевоземельных руд в корках выветривания (рис. 5).

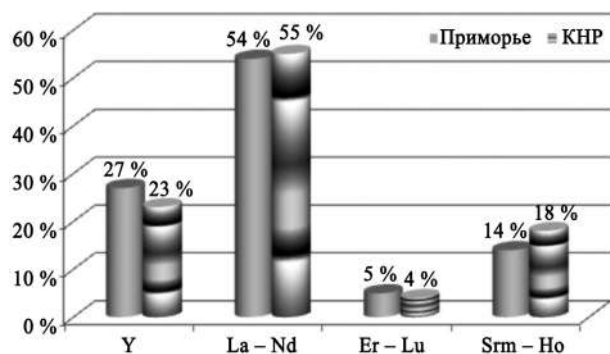


Рис. 5. Составы РЗЭ кор выветривания («ионных руд») месторождений Китая и Приморья

Изучение минерального состава руд и сравнение спектров РЗЭ показывает, что основными редкоземельными минералами являются, по-видимому, карбонаты иттриобастнезит и локкаит, которые хорошо растворяются в азотной кислоте (ЗМ) при температуре 20 °С. Трудновскрываемые формы РЗЭ можно предположительно отнести к монациту и черчиту [4].

Сравнение содержаний РЗЭ в исходных пробах с их концентрациями в отмученных тонких шламах, содержащие в основном глинистые минералы, а также распределение РЗЭ в различных классах крупности, позволяет предположить, что в аргиллизированных породах значительная часть этих элементов может находиться в сорбированной форме на поверхности глинистых минералов.

Высокие уровни извлечения РЗМ (52–82%), аналогичные тем, которые наблюдаются при переработке ион-сорбционных руд китайских месторождений кор выветривания (50–80%), достигаются при выщелачивании руд соевым раствором при комнатной температуре. Это однозначно указывает на возможность их простой и дешевой переработки.

При проведении геологоразведочных работ на ранних стадиях эффективным является предварительная геолого-экономическая оценка искомого объекта до конечного редкометалльного продукта, позволяющая провести локализацию поисково-оценочной площади по параметрам ожидаемой экономической рентабельности искомого редкометалльного объекта. В ИМГРЭ разработаны диаграммы для априорной геолого-экономической оценки рентабельности редкоземельных кор выветривания Урала при поисково-оценочных работах по стоимостному значению индивидуальных РЗМ (рис. 6).

Был сделан вывод, что руды РЗМ в корках выветривания экономически эффективны, если в них доля иттриевых лантаноидов составляет не менее 30–40% (максимальные значения 70–80% характерны для месторождений в корках

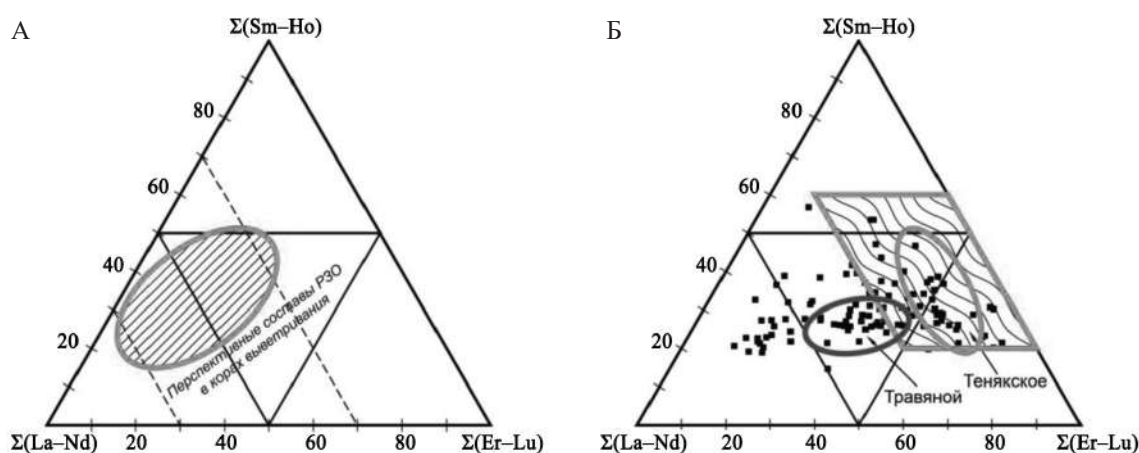


Рис. 6. Априорная геолого-экономическая оценка рентабельности редкоземельных кор выветривания. А – доля лантаноидов иттриевой группы в экономически эффективных рудах редкоземельных кор выветривания, Б – ценовая диаграмма составов оксидов лантаноидов в корках выветривания Урала, точки соответствуют составам и содержаниям РЗМ в пробах кор выветривания Урала, заштрихована область составов, соответствующая условию: потенциальная ценность дефицитных металлов составляет не менее 10 US\$/тонну руды

выветривания в КНР; для Верхне-Макаровского месторождения эта величина составляет 50–55 %) [3].

Таким образом, в минерально-сырьевой базе России значительная часть запасов редких металлов представлена технологически сложными труднообогатимыми рудами с минералами, имеющими близкие физические и химические свойства, склонными к переизмельчению, часто

тонковкрапленными и со взаимным прорастанием. Нередко для получения товарных продуктов требуется применение химико-металлургических схем. Опережающее углубленное изучение вещественного состава комплексных редкометалльных руд позволяет получить надежную оценку их технологических свойств, принимать стратегические и тактические решения относительно конкретных сырьевых объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кременецкий А. А., Копнева Л. А., Левченко Е. Н., Шадрман Ф. И. Иттриеносные коры выветривания: фазовый состав и опыт выщелачивания. В книге «Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и др. металлов». М.: Руда и металлы, 2005. Т. 2. С. 299–305.
2. Лапин А. В., Толстов А. В. Месторождения кор выветривания карбонатитов. М.: Наука, 1995. 208 с.
3. Левченко Е. Н. Научно-методическое обеспечение в системе геологического изучения недр, добычи и переработки минерального сырья. Разведка и охрана недр. 2021. № 6. С. 61–67.
4. Левченко Е. Н., Григорьева А. В. Технологическая оценка качества и обогатимости гидротермальных иттриевоземельных руд в аргиллизированных сланцах. М.: МИСиС. Сб. тезисов VII конгресса обогатителей стран СНГ. 2009. CD-версия.

5. Лихникевич Е. Г. Опережающие минералогические исследования – основа для прогнозирования технологических свойств и выбора оптимальных технологических решений // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 24–29.
6. Середин В. В., Кременецкий А. А., Копнева Л. А. Новый тип гидротермальной иттриевоземельной минерализации в кайнозойских рифтогенных структурах Приморья. М.: ИМГРЭ. Сб. Прикладная геохимия. Вып. 7. Кн. 1. Минералогия и геохимия. 2005. С. 57–78.
7. Середин В. В., Кременецкий А. А., Троч Г. Н. и др. Новый потенциально промышленный тип иттриевоземельной минерализации в Юго-Западном Приморье // Разведка и охрана недр. 2006. № 9–10. С. 37–42.

DOI: 10.17076/tm14_35

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВЕ ВЫСОКОКОМПЛЕКСНЫХ V, U, CU, MO, AU, AG, PT, PD, SE, RE, W, SC, РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ (Y>CE) РУД – НОВЫЙ ТИП ПОЛИМИНЕРАЛЬНО-РЕДКОМЕТАЛЬНОГО СЫРЬЯ (УЗБЕКИСТАН)

*Турсебеков А. Х.¹, Мирходжаев Б. И.², Шарафутдинов У. З.³, Садыкова Л. Р.¹,
Шукуров Ш. Р.¹, Файзиев Ф. Ф.⁴, Рашидов Н. И.¹*

¹ Институт геологии и геофизики им. Х. М. Абдуллаева, Узбекистан

² ГП «Навоийуран», Узбекистан

³ АО «НГМК», Узбекистан

⁴ Навойское отделение АН РУ, Узбекистан

В настоящее время в Республике Узбекистан установлены два генетических типа месторождений урана: гидрогенный и полигенный в углеродисто-кремнистых сланцах. Значительная часть урана (16.6% от общего баланса) связана с рудными месторождениями палеозойского возраста [1, 2, 3, 6]. Полигенные уран-ванади-

евые месторождения Рудное, Новое, Косечка, Джантуар и другие, залегающие в углеродисто-кремнистых сланцах палеозоя, являются высококомплексными (V, Mo, Re, Sc, Se, редкоземельные элементы, Au, Ag, W) образованиями [1–7].

В связи с недостаточной изученностью высоко комплексных уран-ванадиевых руд

на месторождениях Рудное и Новое на предмет распределения и форм нахождения группы элементов в пространстве и во времени были проведены минералогические и аналитические исследования (микроскопия, рентгенофазовый, масс-спектрометрический и микрозондовый анализы) десяти технологических проб.

В результате данных исследований было установлено:

1. Рудовмещающие породы (углеродистые кремнистые сланцы) высоко комплексных уран-ванадиевых руд месторождения Рудное являются сложной гетерогенной геохимической системой: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{MnO} > \text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{BaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{SrO}$, где Na преобладает над K, Ba над Sr (табл. 1). Данные породы также являются сложной гетерогенной минеральной системой, представленные силикатами, алюмосиликатами, карбонатами, фосфатами, оксидами: кварц, альбит, глинистые минералы (каолинит, монтморилинит, гидрослюда, хлорит, шамазит, мусковит, титанит, ильменит, циркон, сфен, апатит, ксенотим, моноцит, кальцит, доломит, барит, розкоэлит, карьеританит, эсколаит, кызылкумит, парамонтоузит, уранинит и др.).

2. Рудовмещающие породы (углеродистые кремнистые сланцы) высоко комплексных уран-ванадиевых руд месторождения Новое резко отличаются от руд месторождения Рудное более интенсивным проявлением гипергенных процессов (табл. 1). Гетерогенная геохимическая система предоставлена следующим рядом элементов: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} > \text{BaO} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{MnO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Cr}_2\text{O}_3$ (табл.) Минеральная гетерогенная система представлена: кварцем, глинистыми минералами (каолином, гидрослюдой, монтморилинитом, хлоритом, шамазитом), баритом, цельзином, кальцитом, доломитом, альбитом, ортоклазом, цирконом, ильменитом, манганитом, вивианитом, горсейкситом, моноцитом и др.

3. В результате детальных исследований высоко комплексных полигенных уран-ванадиевых месторождений Рудное и Новое была установлена геохимическая система элементов в виде катионов и анионов, участвовавших в формировании данных месторождений (табл. 2).

4. Установлено, что гипогенные уран-хром-ванадиевые месторождения Рудное и Новое с высоким комплексом продуктивных элементов являются полигенными и совмещенными во времени и пространстве, представлены самостоятельными промышленными генетическими типами руд: U-Cr-V; Cu-Mo-Re; Au-Ag и редкоземельными элементами (Y-Ce состава), для которых установлены средние содержания продуктивных элементов и минеральные формы их нахождения (табл. 3–7).

5. Необходимо отметить, что нами установлены более высокие содержания редкоземельных элементов в рудах месторождения Новое, которое подверглось интенсивным процессам гипергенеза.

6. Кроме промышленных генетических типов руд, на месторождениях Рудное и Новое установлены в выше кларковых содержаниях Se, W, Hg, Bi, Te, Cd, Sc, для них также установлены минеральные формы их нахождения (табл. 8).

7. Необходимо отметить, что все перечисленные промышленные типы руд месторождений Рудное и Новое подверглись интенсивному гипергенезу (кора выветривания и окислительные процессы), особенно руды месторождения Новое. Для совмещенных типов руд месторождений Рудное и Новое установлена вертикальная зональность распределения минералов по отдельным зонам: окисленные руды, супергенные руды (зона вторичного сульфидного обогащения), гипогенные первичные руды (табл. 9). Ранжирование гипергенной зональности проведено по методике [7]. В процессе гипергенного выщелачивания металлов активное участие принимали такие анионы как SO_4^{2-} , галоиды (Cl^- , Br^- , I^-) (табл. 2).

Таблица 1

Средний химический состав матрицы вмещающих пород уран-хром-ванадиевых месторождений и сопутствующих им других типов оруденения (мас. %)

Месторождения	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ +FeO	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	S _{общ}	P ₂ O ₅	BaO	SrO
Новое (3)	60.57	0.53	0.56	11.64	0.38	2.06	0.71	0.36	12.9	0.84	0.06	2.69	0.35	5.51	0.14
Рудное (5)	72.20	0.62	1.70	8.40	1.40	4.38	0.36	0.25	6.0	0.95	0.09	0.19	0.036	0.30	0.01

Таблица 2

**Геохимическая система основных элементов (катионы и анионы) участвовавших в становлении
высококомплексных уран-хром-ванадиевых и других сопутствующих типов оруденения
месторождений Рудное и Новое**

Матрица вмещающих пород (сланцы)	Руда		Гипергенез
Катионы	Катионы	Анионы	Анионы
Si > Fe > Al > Ca > Mg > K > Na > Ti > Mn > Cr	V > Cu > Zn > U > Mo > Pb > Ni > Co > TR > W > Se > Sc > Ag > Au > Re	S > As > Sb	O ₂ > CO ₃ > SO ₄ > PO ₄ > Cl > I > Br

Примечание: Химические элементы расположены в понижении их содержаний и их активности в рудном процессе.

Таблица 3

**Среднее содержание продуктивных элементов и минеральный состав уран-хром-ванадиевых руд
(мас. %)**

Месторождение	U, г/т	Th, г/т	V	Ti	Fe	Mn	Cr	Минералы
Рудное	0.043	3.1	0.95	0.60	6.01	0.16	0.16	Роскоэлит, деклуазит, карнатит, сульванит, фол- бортит, росит, уванит, уранинит, хеггит, уэксфил- лит, коффинит, монтроузит, V-гетит, гидрогетит, эскалоит, хромит
Новое	0.028	10	0.84	0.71	12.9	0.36	0.11	

Таблица 4

**Среднее содержание продуктивных элементов и минеральный состав сопутствующих
медно-молибденовых руд (мас. %)**

Месторождение	Cu	Mo	Zn	Pb	S	Re, г/т	Минералы
Рудное	0.13	0.04	0.02	0.01	0.19	0.10	Пирит, пирротин энаргит, халькопирит, молиб- денит MoReS ₂ , халькозин, тенарит, делафоссит, куприт, малахит, азурит, молибдит, ильземанит, минерал (MoReS ₂), сфалерит, галенит, гематит, атакамит, вульфенит, молибдит
Новое	0.82	0.03	0.10	0.02	2.69	0.03	

Таблица 5

**Среднее содержание продуктивных элементов и минеральный состав сопутствующих
золото-серебряных руд (мас. %)**

Месторождение	Fe	S	As	Sb	Au, г/т	Ag, г/т	Минералы
Рудное	6.01	0.15	0.04	0.009	0.81	16.2	Самородное золото, монтбрейит, пирит, арсено- пирит, антимонит, аргенто-тетроздрит, фрейбе- рит, полибазит, ялпайт, ситрометрит, науманит, йодаргирит бромаргирит, джемсонит, леллингит
Новое	12.9	2.69	0.01	0.003	0.32	9	

Таблица 6

**Среднее содержание продуктивных элементов и минеральный состав сопутствующий
платиновой минерализации, в г/т**

Месторождение	Pd	Pt	Rh	Ru	Os	Ir	Σ Pt	Минералы
Рудное	0.26	0.06	0.01	0.01	0.01	0.002	0.36	Майченерит (PdBi ₂)
Новое	0.77	0.14	0.03	0.05	0.05	0.008	1.03	

Таблица 7

Среднее содержание продуктивных сопутствующих редкоземельных элементов и минеральный состав, в г/т

Месторождение	Y	La	Ce	Pz	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣTR	Минералы
Рудное	147	17.4	23.7	3.3	44.7	10	3.2	17.1	2.7	20	5.1	11.4	2.0	13.8	1.7	306	Ксенотим, монацит, сульфат-монацит, раб- дофанит, чертит эрицит, вейншенкит, ретцианит, апатит, силикорабдо- фанит, силикоапатит, уэфелдит
Новое	508	93.8	68	15	90.3	34	14	48.4	9	74	13	42.0	6.0	46	5.5	1067	

Таблица 8

Среднее содержание сопутствующих элементов и минеральный состав, в г/т

Месторождение	Co	Ni	Sn	Gd	Re	Ge	Se	Cd	Jn	Te	Tl	Hg	Bi	W	Sc	Минералы
Рудное	166	454	9	6	0.10	1	53.3	2.8	0.08	0.7	6.6	1	3.8	27	44	Se-рейбергит, тиманит берцеленит, селеносера, клокманит, науманит теллуровисмутит, монтбрейит, ReMoS_2 , $\text{Cd}(\text{SbO})\text{H}_2\text{O}$, шеелит, тунгстит, гидротунгстит, монтбрейит, касетерит, стерретит
Новое	392	1267	17	12	0.03	1.2	34.7	12.7	0.13	0.8	3	1.8	3.0	123	46	

Таблица 9

Вертикальная зональность гипергенеза и минеральный состав отдельных зон высококомплексных уран-хром-ванадиевых и других сопутствующих типов руд месторождений Рудное и Новое

Зоны гипергенеза	Горизонт гипергенного профиля	Главные минералы месторождений
Окисленные руды	Верхний	Гетит, гидрогетит, мангонит, псиломелан, вад, опал, аллофан, ванаданит, хегтит, кальцит, азурит, малахит, корвусит, уванит, тюямунит, карнотит, росит, гумит, молибдит, малахит, азурит, брошантит, вульфенит, самородное золото, виванит, рабдофан, гидротунгстит, чертит, скородит, вайншенкит
	Нижний	Самородное золото, мелантерит, ярозит, гипс, калиевые квасы, брошантит, ильземанит, сульфат-монацит
Супергенные руды (зона вторичного сульфидного обогащения)		Халькозин, ковеллин, делофосит, куприт, уитнейт, самородное золото, железо, тенарит, леленгит, молибдит, тунгстенит
Гипогенные первичные руды		Сульванит, кызылкумит, роскоилит, парамонтроизит, кареманит, уранинит, кварц, барит, кальцит, доломит, витерит, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, блеклые руды, молибденит MoReS_2 , вольфрамит, шеелит, монацит, ксенотим, эскалоит, хромит

Из вышеизложенного следует, что впервые в Узбекистане и в мировой практике установлены высококомплексные совмещенные во времени и пространстве четыре полигенных типов руд в месторождениях Рудное и Новое: уран-хром-ванадиевый, медно-молибденовый, золото-серебряный и редкоземельный, а также вышескларковые содержания вольфрама, скандия,

селена и др. элементов, что расширяет перспективы полиминерально-редкометального сырья Республики Узбекистан (табл. 8).

Таким образом, впервые дана оценка высококомплексным уран-ванадиевым рудам на месторождениях Рудное и Новое на предмет распределения и форм нахождения группы элементов в пространстве и во времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ежов Ю. Б., Рахимов Р. Р., Новикова И. В., Рустамжонов Р. Р. Геология, геохимия, минералогия и эталонные месторождения урана. Ташкент, 2016. 219 с.
2. Ежов Ю. Б., Рахимов Р. Р., Новикова И. В. Редкоземельные элементы. Ташкент, 2013. 181 с.
3. Мирходжаев Б. И. Модель мантийно-коровых рудообразующих систем формирования урановых месторождений Узбекистана. Материалы Республиканской научной конференции. 18–19 сентября 2012 г. Ташкент.
4. Семенов Е. Л. Минералогия редких земель. Из-во АН СССР. М., 1963. 411 с.
5. Санакулов К. С., Петухов О. Ф., Руднев С. В. Обогащение уран-ванадиевых руд черносланцевой формации. Горный вестник Узбекистана. 2021. № 2(85). С. 60–63.
6. Сим Л. А. Геохимия, поиски и разведки месторождений урана. Ташкент, 2010. 497 с.
7. Грудев А. П., Яхонтова Л. К. Минералогия окисленных руд. М.: Недра, 1987. 197 с.

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ ЭПР И LA-ICP-MS В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ

Раков Л. Т.

ИГЕМ РАН, Москва

Кварц является важнейшим видом нерудного сырья, так как имеет применение в современных технологиях. Наибольшее значение имеет кварц высокой чистоты, представляющий собой продукт переработки природного кварца, очищенный от минеральных и химических примесей до уровня их содержания не более 20–30 ppm. Правительством Российской Федерации от 1996 года особо чистое кварцевое сырье было включено в Перечень основных видов стратегического минерального сырья [11].

Проблема очистки кварца от примеси Al

Для получения высокочистых кварцевых концентратов требуется использование природного кварца, в котором исходное содержание примесей невелико. Причем в наименьшем количестве кварц должен содержать примеси, связанные с матрицей минерала. Опыт предыдущих работ свидетельствует, что их удаление невозможно или связано с большими трудностями [3, 6, 8, 10].

В частности, одной из трудно устранимых примесей является алюминий. Как известно, ионы Al^{3+} могут внедряться в кристаллическую структуру кварца и образовывать разнообразные структурные дефекты [16]. Снизить их содержание до пренебрежимо низкого уровня не удастся даже мировому лидеру в производстве высокочистых кварцевых концентратов компании «Юнимин», поставляющей на мировой рынок свыше 90 % этой продукции под маркой IOTA.

Действительно, данные в таблице показывают, что концентрация примеси Al в ее кварцевом концентрате не меняется при переходе от сорта IOTA 4 к более высокому сорту IOTA 6. Практически та же тенденция проявляется и при переходе от сорта IOTA 6 к продукции наивысшего качества IOTA 8. Важно отметить, что содержание примеси Al, сохраняющееся в особо чистом кварце, намного превышает суммарную концентрацию всех остальных примесей.

Таблица

Стандарты особо чистого кварца компании «Юнимин» по содержаниям некоторых элементов-примесей (ppm) [1]

Сорт	Al	Fe	Ti	Ca	Li	Na	K
IOTA 8	7.0	<0.03	1.2	0.5	<0.02	0.03	<0.04
IOTA 6	8.0	0.15	1.4	0.6	0.15	0.08	0.07
IOTA 4	8.0	0.30	1.4	0.6	0.15	0.9	0.35
IOTA -std	16.2	0.30	1.3	0.5	0.90	0.9	0.6

Интересно, что аналогично ведет примесь титана, которая также способна внедряться в кристаллическую решетку кварца [15]. Содержание этой примеси остается относительно высоким и также почти не меняется при повышении степени очистки кварцевых концентратов (табл.). Наблюдаемые закономерности указывают на необходимость глубокого изучения форм нахождения примесей в кристаллической структуре кварца. Результаты таких исследований могут

найти применение в прогнозировании поведения примесей при технологической переработке минерала.

В настоящей работе вопрос взаимодействия с матрицей минерала рассматривается для примеси Al, как наиболее распространенной и проблемной примеси в кварце. Обзор литературы свидетельствует, что по этому вопросу к сегодняшнему моменту накоплен значительный материал. В частности, установлены основные

закономерности внедрения примеси Al в кварц в природных условиях [5], проведены оценки концентраций этой примеси в образцах кварца ряда месторождений кварцевого сырья [2, 4, 6, 13], получены экспериментальные данные, подтверждающие многообразие форм нахождения примеси Al в кристаллической структуре кварца [8].

Последний результат имеет особое значение. Как отмечалось ранее, характер распределения примесей определяет выбор методов обогащения кварца [9]. Поэтому выявление форм нахождения примеси Al в матрице кварца представляется необходимой операцией при оценке качества кварцевого сырья.

Наши исследования показывают, что данная операция может быть легко осуществима, если анализ кварца проводить комплексом методов. Каждый из них обеспечивает регистрацию какой-либо из форм нахождения примеси, а сочетание методов способствует получению полной картины распределения примеси в кварце.

Относительно простым вариантом исследования характера распределения примеси Al в кварце является комбинирование метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерной абляцией (LA-ICP-MS).

Возможности методов ЭПР и LA-ICP-MS в анализе примеси Al в кварце

Метод ЭПР предоставляет возможность регистрировать в кварце целый ряд структурных дефектов, связанных с примесью алюминия [16]. Наибольшей концентрацией из них обладают Al–O–центры, обусловленные изоморфным замещением ионов Si^{4+} в кристаллической решетке кварца ионами Al^{3+} . Ионами-компенсаторами для изоморфной примеси алюминия могут служить Li^+ , Na^+ или H^+ . Важным достоинством метода ЭПР является возможность количественного измерения концентраций Al–O–центров. Пересчитывая их значения в концентрации примесей нетрудно определить содержания изоморфного алюминия (N_{Al}) в кварце.

В то же время следует учитывать, что регистрация изоморфного алюминия методом ЭПР может осуществляться только в областях совершенной кристаллической структуры. В зонах дефектности минерала кристаллическая решетка искажена, и линии ЭПР претерпевают значительное уширение или отсутствуют в спектре вообще [8].

Важно также отметить, что на спектрах ЭПР амплитуда линий Al–O–центров в кварце обычно намного превышает суммарный сигнал от других парамагнитных центров, связанных с примесью Al. Поэтому значение концентрации Al–O–центров N_{Al} в кварце охватывает практически весь Al, локализованный в областях совершенной структуры минерала.

Методом LA-ICP-MS можно регистрировать весь алюминий в кварце. Он не дает сведений о формах нахождения примеси Al, однако помогает судить о характере ее распределения в минерале. В самом деле, определяемая с помощью метода LA-ICP-MS валовое содержание примеси (C_{Al}) представляет собой сумму средних концентраций Al, одна из которых относится к зонам дефектности кварца, а другая – к областям его совершенной кристаллической структуры. Отсюда ясно, что разность между значениями C_{Al} и N_{Al} отвечает средней концентрации примеси Al, локализованной в зонах дефектности минерала. Следовательно, комбинирование методов ЭПР и LA-ICP-MS открывает возможность определения количеств Al, связанных с матрицей кварца в зонах дефектности и областях совершенной кристаллической структуры.

Надо сказать, что полученный вывод справедлив в случае, если в объеме кварца, анализируемом методом LA-ICP-MS, отсутствуют минеральные формы примеси Al и газовой-жидкие включения. Технология проведения анализа кварца методом LA-ICP-MS благоприятна для соблюдения этих условий. Как известно, указанный анализ выполняется на отдельных кварцевых зернах исследуемого образца в ограниченном объеме вещества. При извлечении материала методом лазерной абляции диаметр кратера выжигания может не превышать 90 мкм, а глубина выжигания составлять всего 40 мкм. Столь высокая локальность анализа дает возможность избегать ошибок, связанных с присутствием в кварце минералов Al и других микровключений.

Таким образом, совместное использование методов ЭПР и LA-ICP-MS позволяет детализировать картину распределения примеси Al по зонам дефектности кварца. Каждая из этих форм алюминия способна вести себя по-разному в процессе обогащения кварца и влиять на степень его очистки.

Заметим, что для использования в комплексе с методом ЭПР в принципе пригодны и другие методы измерения валовых содержаний примеси Al в кварце. К ним относятся метод рентгено-

флуоресцентного анализа, метод атомно-абсорбционной спектроскопии, методы спектрального анализа и др. Однако их применение возможно в отсутствие значительных содержаний неструктурной примеси алюминия в кварце.

Особенности образования примеси Al в матрице природного кварца

Для понимания поведения примеси Al в процессе технологического передела кварца необходимо знать, каким способом она проникает в матрицу минерала и какими свойствами обладает. Как следует из обзора литературы, накопление примеси Al в кварце в природных условиях происходит во время его формирования и имеет ряд характерных особенностей.

Установлено, что вхождение примеси Al в кристаллическую структуру кварца осуществляется двумя путями – при кристаллизации минерала или при последующей его рекристаллизации [5]. При этом ионы-компенсаторы, захватываемые изоморфными ионами Al^{3+} , в этих случаях различны. Если на стадии кристаллизации они в основном представлены ионами H^+ , то на стадии рекристаллизации – ионами Li^+ [7]. Подобная дифференциация вызвана разными диффузионными свойствами ионов-компенсаторов.

Дело в том, что ионы H^+ обладают наибольшей диффузионной подвижностью в дефектном кварце за счет перемещения по механизму прыжковой диффузии по структурным дефектам с эффективным отрицательным зарядом [12]. Диффузионная активность ионов Li^+ , напротив, растет с повышением степени совершенства кристаллической структуры, поскольку их перемещение описывается атомистическим механизмом диффузии [14]. Поэтому при низкой степени рекристаллизации кварца, когда его дефектность высока, наиболее конкурентоспособными являются ионы-компенсаторы H^+ , а при высокой степени рекристаллизации – ионы Li^+ .

В работе [7] было установлено, что содержание ионов $Li^+(C_{Li})$ в кварце монотонно возрастает с повышением степени упорядочения его кристаллической структуры. Это дает основание использовать значение C_{Li} в качестве показателя интенсивности рекристаллизации минерала [8]. Соответственно, новый смысл приобретают графики зависимостей $C_{Al}(C_{Li})$, которые часто встречаются в литературе, посвященной изучению кварца. Они могут рас-

сматриваться как графическая демонстрация поведения примеси Al в процессе рекристаллизации кварца. При этом величины C_{Al} , наблюдаемые при низких значениях C_{Li} , будут соответствовать низкой степени рекристаллизации минерала, а величины C_{Al} , обнаруженные при высоких значениях C_{Li} , отвечать высокой степени рекристаллизации.

Один из таких графиков приведен в работе [13] (рис. 1). Он был построен по результатам анализа методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии образцов пегматитового кварца, отобранного из месторождений трех муниципалитетов Бразилии: Пиум, Бататал и Лимейра. Эти месторождения рассматривались авторами работы как потенциальные источники высокочистого кварцевого сырья. Концентрации примесей Al и Li на рисунке оцениваются количеством атомов на миллион атомов кремния.

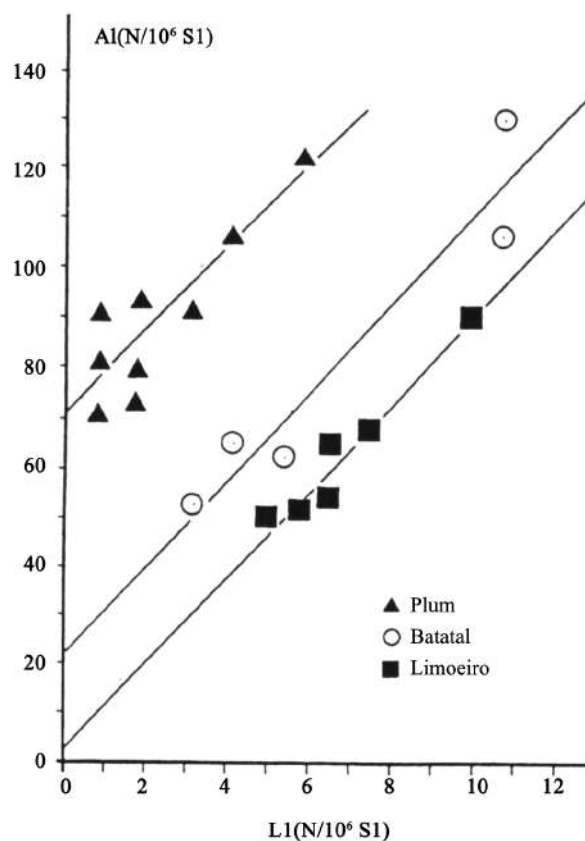


Рис. 1. График зависимости концентрации алюминия от содержания лития в образцах кварца ряда месторождений Бразилии [13]

Анализируя график на рисунке 1 можно выявить некоторые особенности образования примеси Al в матрице исследованного кварца Бразилии. В частности, можно оценить количество примеси Al, захватываемое кварцем при

кристаллизации. На графике $C_{Al}(C_{Li})$ оно соответствует значению $C_{Li} \approx 0$, наблюдаемому в отсутствие рекристаллизации кварца. В данной ситуации примесь Al могла поступать в минерал только при его кристаллизации. Сравнивая между собой отрезки, отсекаемые от оси ординат разными прямыми, можно сказать, что кварц месторождения Лимейры при кристаллизации практически не захватывал алюминий, а на месторождении Пиум кристаллизация обусловила появление основной части этой примеси.

Графики $C_{Al}(C_{Li})$, приведенные в литературе для других исследованных образцов кварца, по своему виду аналогичны графику на рисунке 1. Вместе с тем в некоторых случаях отмечается появление графиков зависимости $C_{Al}(C_{Li})$, имеющих совершенно иной вид (рис. 2). Есть основания полагать, что они обусловлены возникновением в кварце неизвестной формы Al.

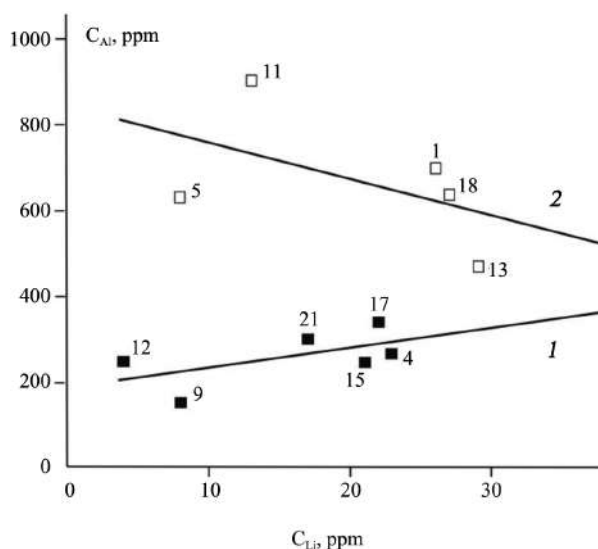


Рис. 2. График зависимости концентрации алюминия C_{Al} от содержания лития C_{Li} в образцах низкотемпературного (прямая 1) и высокотемпературного кварца (прямая 2) золоторудного месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье) [8]

Кластерная форма нахождения примеси Al в матрице кварца

Необычный вид зависимости $C_{Al}(C_{Li})$ был обнаружен для образцов кварца месторождения золота Дарасун (Восточное Забайкалье). По температуре образования их можно было разбить на две группы – низкотемпературную и высокотемпературную.

Группа низкотемпературного кварца описывается обычным графиком зависимости $C_{Al}(C_{Li})$,

представляющим собой прямую 1 с положительным углом наклона (рис. 2). Для нее характерна существенная концентрация примеси Al, возникающая при кристаллизации данного кварца. Об этом говорит значительная длина отрезка, отсекаемого прямой 1 графика зависимости $C_{Al}(C_{Li})$ от оси ординат.

Кристаллизация высокотемпературного кварца золоторудного месторождения Дарасун обуславливает появление еще большего содержания примеси алюминия (рис. 2, прямая 2). Длина отрезка, отсекаемого от оси ординат, в этом случае возрастает в 4 раза. Более того, последующая его рекристаллизация приводит не к увеличению концентраций примеси Al, а к уменьшению значений C_{Al} . Такое поведение примеси Al указывает на особую форму ее нахождения в кварце.

Как предполагается, эта форма может быть связана с образованием в матрице минерала кластеров, имеющих сложное строение и содержащих в своем составе ионы Al^{3+} [8]. Их формирование происходит в процессе кристаллизации кварца при повышенных температурах из минералообразующих растворов с высоким содержанием ионов металлов. Существование кластерной формы примеси Al в кварце требует особого внимания и предполагает разработку специальных технологий его обогащения.

Действительно, кластерная форма нахождения примеси в кварце имеет ряд особенностей. В частности, с этой формой примеси в кварц может вноситься очень большое количество Al. Содержание Al, связанное с ней, превышает концентрацию Al, образующуюся при рекристаллизации кварца (рис. 2).

Другая особенность кластерной формы нахождения Al в кварце заключается в ее термической нестабильности. Отрицательный угол наклона прямой 2 на рисунке 2 показывает, что в природных условиях значительная часть кластеров, содержащих Al, распадается при рекристаллизации кварца. Необходимо обратить внимание, что одновременно с этим наблюдается и вынос примеси Al из минерала. Его уходу из кварца способствует природная среда, благоприятная диффузионному переносу примесей из кварца в окружающее минеральное пространство.

При технологическом переделе кварцевого сырья таких условий для самоочистки кварца от примеси Al не существует. Поэтому ионы Al^{3+} , освободившиеся после термического разрушения кластеров, будут оставаться в кварце. Под воздействием высоких температур они

способны внедряться в кристаллическую структуру и многократно увеличивать содержание изоморфных примесей Al в кварце.

Доступность очистки кварца с разными формами примеси Al

Форма нахождения ионов Al^{3+} в матрице кварца в решающей степени определяет перспективу очистки кварцевого сырья от примеси алюминия.

Наиболее трудно устранимы ионы Al^{3+} , расположенные в областях совершенной кристаллической структуры кварца. Их присутствие вызвано локальными напряжениями, появляющимися в кварце при залегании в горных породах или воздействии естественного радиационного поля [8]. Очищение этих областей от примеси Al представляет собой чрезвычайно сложную задачу, для решения которой необходимо создание соответствующей научно-методической базы. Поэтому к настоящему моменту приходится констатировать, что измеряемое методом ЭПР содержание Al является пределом обогатимости кварцевого сырья [6]. В соответствии с этим значение N_{Al} приобретает статус важнейшего показателя его качества.

Если же ионы Al^{3+} концентрируются в зонах дефектности минерала, то они с высокой вероятностью могут быть удалены из кварца при химической очистке с использованием плавиковой кислоты. Как известно, зоны структурных нарушений в первую очередь подвергаются растворению под воздействием кислот. Это позволяет очищать кварц и от локализованной в них примеси алюминия. Эффективность химического обогащения кварца удобно оценивать по динамике изменения величины $(C_{Al} - N_{Al})$ в процессе кислотной обработки. Свидетельством высокой степени очистки кварца может служить выполнение приближительного равенства $C_{Al} \approx N_{Al}$.

Однако подобный способ очистки кварца от примеси Al, находящейся в зонах структурных нарушений, может оказаться слишком затратным. Растворение этих зон часто сопровождается потерей существенной части обогащаемого кварцевого сырья. В такой ситуации возможно применение других методов обогащения кварца [3].

Особого рассмотрения требует кластерная форма примеси Al. Хотя она встречается относительно редко, ее присутствие заметно усложняет технологию очистки кварца от примеси Al. При термодроблении или другом нагревании кварца в ходе обогащения неизбежен переход ионов

Al^{3+} из разрушающихся кластеров в трудно устранимую изоморфную форму.

Ввиду сказанного кварцевое сырье, содержащее Al в кластерной форме, рекомендуется перед технологическим переделом подвергать воздействию полей сверхвысокой частоты [10]. Как было установлено, СВЧ-излучение способствует коагуляции рассеянных примесей, не связанных с матрицей минерала. К их числу относятся и ионы Al^{3+} , появляющиеся в кварце после распада кластеров. Взаимодействуя с ионами других рассеянных примесей, они образуют квантоворазмерные коллоидные системы и теряют способность внедряться в кристаллическую решетку минерала.

Наличие кластерной формы примеси Al в матрице кварца выявить сложно. По крайней мере, в настоящее время не существует метода, позволяющего регистрировать ее отдельно от других форм Al в кварце. Тем не менее, она способна проявлять себя в виде особого графика зависимости $C_{Al}(C_{Li})$, представляющего собой прямую линию с отрицательным углом наклона (рис. 2, прямая 2). Этот признак без труда может быть обнаружен при исследовании образцов кварцевого сырья методом LA-ICP-MS и должен учитываться при разработке технологии его обогащения.

Вообще говоря, алюминий, связанный с кластерной формой, является частью того Al, которому отвечает отрезок, отсекаемый от оси ординат графиком зависимости $C_{Al}(C_{Li})$. Если длина этого отрезка незначительна, то говорить о серьезном вкладе кластерной формы в общую концентрацию примеси Al не приходится. Ярким примером такого случая служит график зависимости $C_{Al}(C_{Li})$ для кварца месторождения муниципалитета Лимейра (рис. 1).

Заключение

Таким образом, совместное использование методов ЭПР и LA-ICP-MS позволяет определять формы нахождения ионов Al^{3+} в матрице кварца и прогнозировать поведение примеси алюминия в процессе технологического передела кварцевого сырья. Полученная информация может использоваться при оценке качества сырья и разработке эффективных технологий его обогащения.

Особое значение имеют сведения о концентрации изоморфной примеси алюминия N_{Al} , устанавливаемой методом ЭПР, а также о валовых содержаниях примесей алюминия C_{Al}

и лития C_{Li} , измеряемых методом LA-ICP-MS. Концентрации N_{Al} отвечают примеси Al, локализованной в областях совершенной кристаллической структуры, и поэтому определяют предел обогатимости кварца. По значениям N_{Al} можно оперативно, без значительных затрат проводить разбраковку образцов кварцевого сырья и выбирать из них наиболее перспективные.

Основная часть Al, регистрируемого методом LA-ICP-MS, располагается в зонах дефектности, и может удаляться при очистке кварца. В частности, эта часть примеси подвергается выщелачиванию при химическом травлении кварца, поскольку зоны неупорядоченной структуры наименее устойчивы к воздействию кислот. Количество устраненной при травлении

примеси может быть оценено по разности концентраций $(C_{Al} - N_{Al})$. Признаком эффективной технологии очистки кварца от примеси Al в зонах дефектности является достижение приближительного равенства $C_{Al} \approx N_{Al}$.

Характер зависимости $C_{Al}(C_{Li})$ для образцов кварцевого сырья может служить показателем присутствия в них примеси Al в кластерной форме. При высоких содержаниях алюминия график зависимости $C_{Al}(C_{Li})$ принимает вид прямой линии с отрицательным углом наклона. В случае обнаружения кластерной формы Al необходима предварительная обработка кварцевого сырья полями СВЧ, позволяющая избегать загрязнения минерала примесью Al при нагревании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гадиятов В. Г., Киях Д. А., Жидкова С. А. К проблеме использования кварцевого песка для получения особо чистого кварца // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2010. № 2. С. 324–327.
2. Данилевская Л. А., Скамницкая Л. С., Щипцов В. В. Кварцевое сырье Карелии / Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2004. 226 с.
3. Исаев В. А. Структурные примеси в кварце. Часть I. Обзор и анализ традиционных способов очистки кварца от структурных примесей: М.: МГТУ. Горный инф.-аналитич. бюл. № 9. 2006. С. 11–23.
4. Кузнецов С. К., Лютоев В. П., Котова Е. Н., Шанина С. Н. Приполярноуральская кварцевожильно-хрусталеносная провинция и перспективы поисков месторождений особо чистого кварца // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 36–43.
5. Раков Л. Т. Механизмы изоморфизма в кварце // Геохимия. 2006. № 10. С. 1085–1096.
6. Раков Л. Т., Миловидова Н. Д., Моисеев Б. М., Огурцов В. Г. Новый метод оценки качества кварцевого сырья // Разведка и охрана недр. 1993. № 7. С. 36–38.
7. Раков Л. Т., Прокофьев В. Ю., Зорина Л. Д. Ионы-компенсаторы H^+ и Li^+ в структурных каналах кварца месторождений золота Дарасунского рудного поля (Восточное Забайкалье, Россия): данные электронного парамагнитного резонанса // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 1. С. 75–96.
8. Раков Л. Т., Прокофьев В. Ю., Минервина Е. А., Зорина Л. Д. Алюминий в кварце месторождения золота Дарасун (Восточное Забайкалье, Россия) // Гео-ресурсы. 2022. Т. 24. № 1. С. 51–61.
9. Скамницкая Л. С., Данилевская Л. А. Выбор методов обогащения кварца на основе закономерностей распределения и форм нахождения в нем примесей (на примере участков Меломайс и Фенькина Лампи) / Сборник научных статей по материалам Российского семинара по технологической минералогии «Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов». Петрозаводск, 2009. С. 83–94.
10. Скамницкая Л. С., Раков Л. Т., Дубинчук В. Т., Бубнова Т. П. Метод опережающей диагностики обогатимости кварца // Разведка и охрана недр. 2018. № 10. С. 62–66.
11. Собрание законодательства Российской Федерации. 22.01.1996. № 4. С. 390.
12. Урицкий М. З., Цидильковский В. И. Роль акцепторной примеси в переносе протонов в протон-проводящих оксидах // ФТТ. 2014. Т. 56. Вып. 11. С. 2104–2110.
13. Iwasaki H., Iwasaki F., Oliveira V. A. R., Hummel D. C. A., Pasquali M. A., Guzzo P. L., Watanabe N., Suzuki C. K. Impurity content characterization of Brazilian quartz lascas // Jpn. J. Appl. Phys. 1991. V. 30. N 7. P. 1489–1495.
14. Panchmatia P. M., Armstrong A. R., Bruce P. G., Islam M. S. Lithium-ion diffusion mechanisms in the battery anode material // Phys. Chem. Chem. Phys. 2014. V. 16. P. 21114–21118.
15. Wright P. M., Weil J. A., Anderson J. H. Titanium colour centres in rose quartz // Nature. 1963. V. 197. P. 246–248.
16. Weil J. A. A review of electron spin spectroscopy and its application to the study of paramagnetic defects in crystalline quartz // Phys. and Chem. of Minerals. 1984. V. 10. P. 149–165.

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА КУТЫН

*Красюкова Т. О.¹, Азарян А. М.^{1,2}, Анисимов И. С.¹, Васильев А. М.¹,
Баданина Е. В.², Агапов И. А.¹*

¹ АО «Полиметалл Инжиниринг», г. Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Месторождение Кутын расположено в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края России, в южной части Тугурского полуострова между Тугурским и Ульбанским заливами, в 113 км к северо-востоку от Албазинского золоторудного месторождения. Кутын находится в северо-западной части Ульбанского турбидитового террейна Монголо-Охотского орогенного пояса. С точки зрения районирования золотоносных площадей юга Дальнего Востока, относится к Нижнеамурской зоне Сихотэ-Алинской провинции Тихоокеанского золотоносного пояса [3, 4].

Рудные штокверковые зоны локализованы в эндо- и экзоконтактах Биранджинского массива. Руды представлены кварц-карбонат-серпичитовыми метасоматитами по гранодиоритам и песчаникам, а также кварц-карбонатными жилами. Распространены руды с вкрапленными, прожилково-вкрапленными, прожилко-

выми текстурами. Многие разновидности руд брекчированы, катаклазированы, окислены. Среднее содержание золота в руде составляет 3.0 г/т. [1].

В рамках работы были изучены пробы эксплуатационного геотехнологического картирования пяти рудных зон. Пробы представлены упорными золотыми рудами с низкой долей цианируемого золота.

Для типизации рядовых проб были использованы следующие признаки: протолит (гранодиорит, песчаник), степень метасоматических изменений, окисленность (*гётит/сульфиды*), количество кварц-карбонатного прожилкования. На основании выделенных литотипов и пространственного расположения рядовые пробы были объединены в 49 частных технологических проб (ЧТП), которые стали объектом дальнейшего исследования (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики проб по рудным зонам

Рудная зона	Глубина опробования, м	Масса, кг	Количество ЧТП	Количество рядовых проб	Среднее содержание золота, г/т
Седловинная	30–360	582.5	15	253	3.38
Дельинская	34–150	152.1	9	87	3.82
Родниковая	60–100	48.3	4	32	9.19
Геофизическая	40–103	174.9	14	106	4.39
Перевальная	28–107	94.1	7	54	4.88

Мультиэлементный анализ проб выполнен в лаборатории «СЖС Восток Лимитед» (г. Чита) с использованием методов атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой ICP-AES с предварительным сплавлением с метабора́том лития (16 элементов), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS с предварительным мультикислотным разложением проб (48 элементов) и метода

пробирного анализа (благородные металлы Au, Ag). Остальные аналитические исследования и эксперименты по гравитационному и флотационному обогащению и агитационному выщелачиванию руд выполнены в АО «Полиметалл Инжиниринг». Количественное определение минерального состава проб проведено методом порошковой рентгеновской дифракции методом Ритвельд. Концентрации серы и углерода

в пробах определены методом ИК-спектроскопии в соответствии с отраслевыми методиками (ТПИ 1.1.553.С.2018 НСАМ № 553-С, ТПИ 1.1.554.С.2018 № 554-С) [2]. Доля мышьяка окисленных форм рассчитана как отношение измеренного содержания мышьяка в окисленных минералах (скородит, мышьяковистый гётит

и др.) к общему содержанию мышьяка в руде. Концентрации мышьяка в руде и минералах определены атомно-абсорбционным методом.

Существенные вариации извлечения золота как во флотоконцентраты, так и в продуктивные растворы (табл. 2) диктуют необходимость деления рудного материала по сортам.

Таблица 2

Результаты гравитационных, флотационных опытов и цианирования

Продукты	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
Флотоконцентрат	1.6–18.1	15.0–200	44.9–86.4
Гравитационно-флотационный концентрат	1.9–18.3	17.0–187	53–90
Продуктивный раствор	–	–	12.1–66.2

В изученных пробах основными минералами являются кварц (28–56%), слоистые силикаты (20–40%), полевые шпаты (3–43%) и карбонаты (1.5–25%) (рис. 1). В пробах диагностированы акцессории: турмалин, актинолит, циркон, рутил, анатаз, ильменит, магнетит, гетит, гематит, апатит, гипс, ярозит. Сульфиды составляют 0.5–5.3% и представлены пиритом и арсенопиритом.

Несмотря на схожий макроэлементный состав, метасоматиты наследуют геохимические

черты протолита: метасоматиты по гранодиоритам отличаются более высокими содержаниями Rb, V, Cr (рис. 2). Они также часто несут медную-висмут-сурьмяную минерализацию, не представленную во вмещающих породах.

Изменение микроэлементного состава при метасоматозе заключается в выносе Na, Ba и Sr – элементов, входящих в плагиоклаз, и накоплении рудных элементов, отражающих минеральные ассоциации самородного золота – Ag, Bi, Cu, Zn, Sb, As, S (рис. 3).

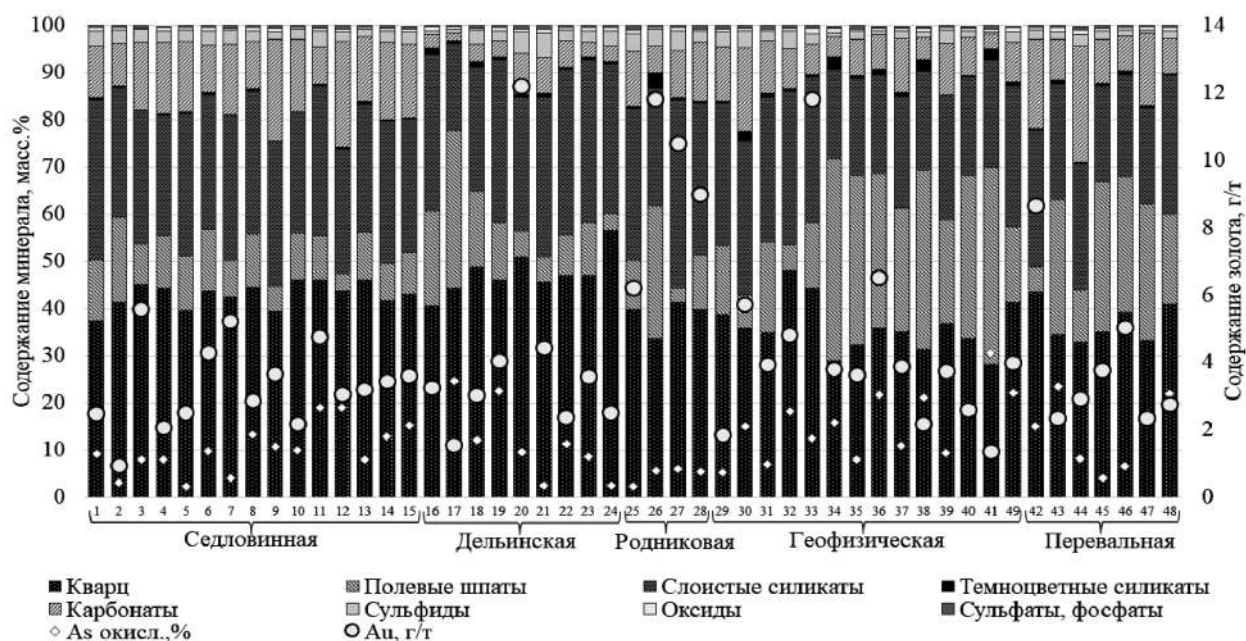


Рис. 1. Общий минеральный состав проб

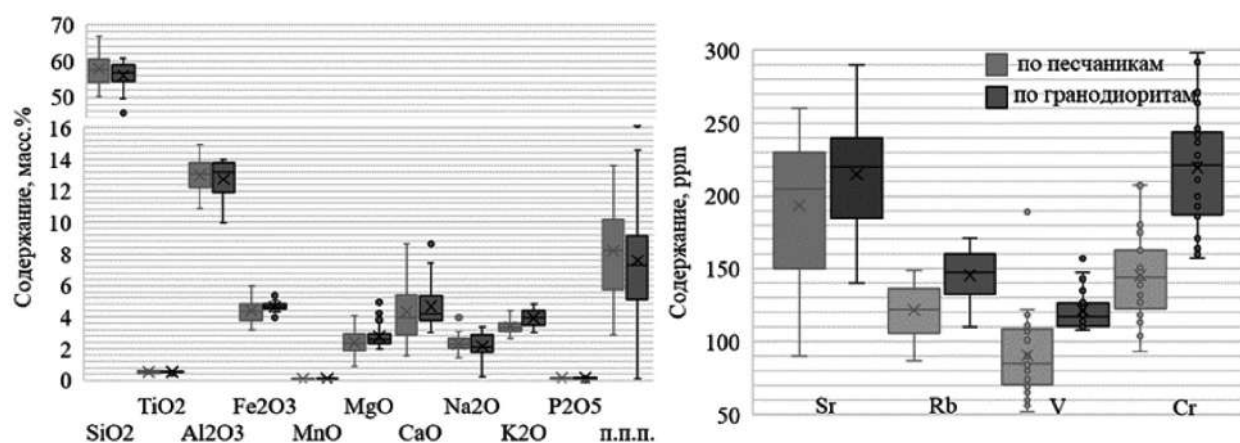


Рис. 2. Вариации состава метасоматитов по песчаникам и гранодиоритам

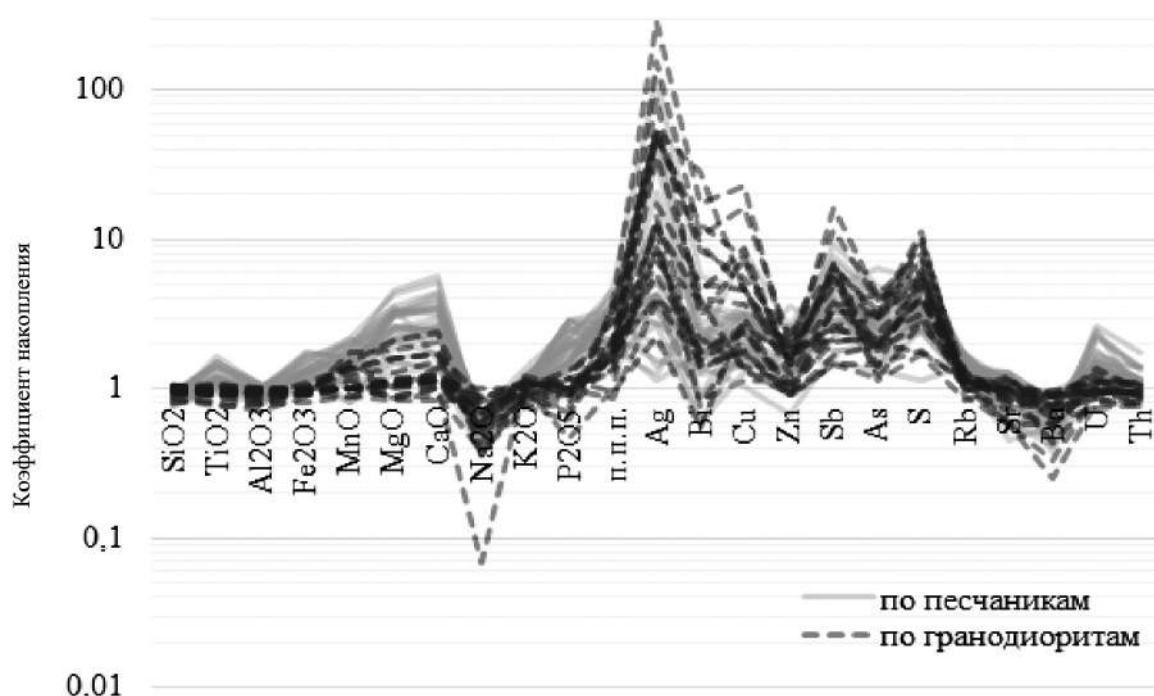


Рис. 3. Изменение петрохимического и микроэлементного состава гранодиоритов и песчаников при метасоматозе. Коэффициент накопления – отношение содержания элемента в рудоносном метасоматите к его содержанию в неизменной породе

Статистический анализ данных был проведен на основе 113 параметров:

- общий минеральный состав исходных проб по данным рентгенофазового анализа;
- содержания общей серы и углерода (S_{total} , C_{total});
- результаты химического анализа методами ICP-AES и ICP-MS;
- содержания благородных металлов (Au, Ag);
- тонина помола по выходу класса – 71 мкм (P-71);

- содержание (α) и извлечение (ϵ) элементов в гравитационный концентрат (GC), флотоконцентрат (C), хвосты (T) и черновые концентраты (SC);
- выход концентратов, гравитационных концентратов, хвостов, черновых концентратов и тяжелой фракции исходных проб $+2.9 \text{ г/см}^3$ (γC , γGC , γT , γSC , γH);
- водородный показатель пульпы после измельчения и при флотации (pH, pHFI).

Ввиду того, что большинство параметров характеризуется логнормальным распределением,

а некоторые нормализованы на 100%, в анализе были использованы значения, преобразованные по Ачисону.

Корреляционные связи, показали наличие шести основных минерально-элементных ассоциаций:

- хлорит-актинолит-полевошпатовый (Na, γ T, ϵ SsfdGC, содержания альбита, ортоклаза, микроклина, хлорита и актинолита);
- фосфатно-оксидной (P, TiO_2 , Fe_2O_3 , V, Sc, Co);
- золото-теллур-медной (Au, Ag, Te, Cu, Pb, Cd, C_{total} , α AuGC, α AgGC, ϵ AgGC, α AgC, ϵ AgC, α AsC, α AuSC, α AgSC, ϵ AgSC, α AuT, содержания марказита и сидерита);
- карбонатной (MgO , CaO , содержания анкерита и доломита);
- пирит-кварцево-слюдистой (As, S_{total} , Sb, P-71, α SsfdGC, γ C, ϵ AuC, ϵ AsC, α SsfdC, ϵ SsfdC, γ SC, ϵ AuSC, ϵ AsSC, α SsfdSC, ϵ SsfdSC, α FeSC,

содержания пирита, арсенопирита, кварца, мусковита, иллита);

– арсенопиритовой (As, α AsGC, α AsSC, ϵ AuC, содержания арсенопирита и кварца).

Потери золота при флотации положительно коррелируют с окислением мышьяка, а также связаны первично значимыми связями с хлорит-актинолит-полевошпатовым геохимико-минеральным комплексом (медленно флотируемые сростки золота с полевыми шпатами и хлоритом). Вследствие низкого извлечения золота цианированием, можно предположить, что рассеянные частицы золота инкапсулируются в арсенопирите и являются упорными для выщелачивания. Связь извлечения золота в черновой флотоконцентрат и продуктивный раствор со степенью окисленности мышьяка проиллюстрирована на рисунке 4. На основе данных о доле окисленного мышьяка и извлечения золота в продуктивный раствор возможно разделить пробы на три композита (рис. 5).

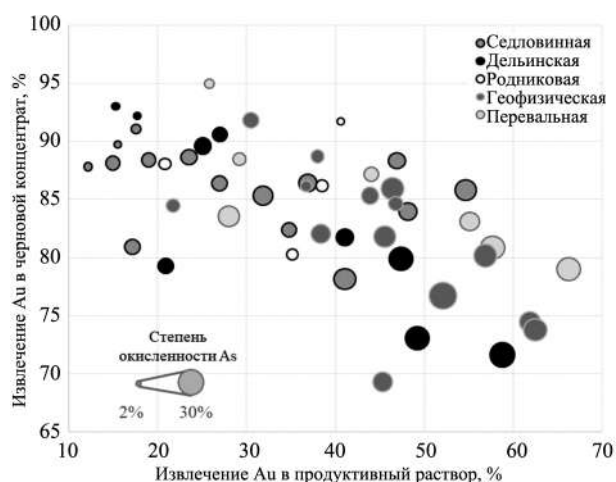


Рис. 4. Зависимость извлечений золота в продуктивный раствор и черновой флотоконцентрат от доли мышьяка окисленных форм

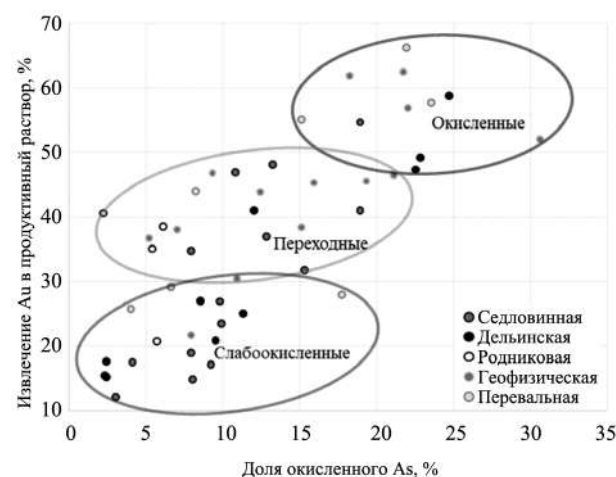


Рис. 5. Разделение проб на композиты

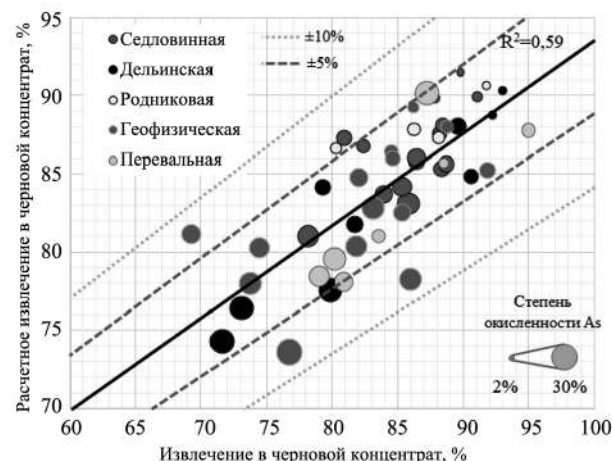


Рис. 6. Диаграмма прогнозных и опытных извлечений золота в концентрат

С целью прогноза извлечения золота в черновой концентрат (ϵAuSC) был проведен регрессионный анализ. В качестве независимых переменных были выбраны содержания элементов. Прогноз извлечения золота в концентрат

$$\epsilon\text{AuSC} = 104.15 + 0.001\text{As}/\text{Au} - 0.523\text{As}_{\text{окисл}} - 0.124\text{S}_{\text{total}} + 0.677\text{C}_{\text{total}} - 0.209\text{SiO}_2 - 0.01\text{Cr} - 0.076\text{CaO} - 0.084\text{Na}_2\text{O}.$$

Закключение

Изученные пробы представлены березитами, развивающимися по песчаникам и гранодиоритам, а также прожилковыми брекчиями. Основными рудными минералами являются пирит и арсенопирит. Существенные вариации извлечения золота в пробах, как флотацией, так и цианированием, свидетельствует о необходимости деления рудного материала по сортам. В качестве критериев предложено использовать

на основе элементного состава рассчитан с вероятностью $R^2 = 0.59$. Более 85% случаев попадают в 5% интервал вероятности (рис. 6). Формула включает девять наиболее значимых параметров вариативности пробы:

долю окисленного As и извлечение золота в продуктивный раствор. Связи между извлечением золота флотацией и цианированием, и степенью окисленности мышьяка свидетельствуют о том, что существенная часть золота рассеяна в арсенопирите и является упорным для выщелачивания. Такое предположение согласуется с ранее проведенными исследованиями [1].

Часть исследований выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90102).

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарян А. М., Баданина Е. В., Анисимов И. С. Минеральный состав руд золотоносных метасоматитов месторождения Кутын (Хабаровский край) // Записки РМО. 2022. Ч. CLI. № 3. С. 1–21.

2. Отраслевой реестр методик анализа, допущенных (рекомендованных) к применению при лабораторно-аналитическом обеспечении ГРП на ТПИ // Федеральное агентство по недропользованию, ФГБУ «ВИМС». Москва, 2019. Лист 100–101 реестра.

3. Ханчук А. И., Иванов В. В. Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 11. С. 1635–1645.

4. Шевченко Б. Ф., Попеко Л. И., Диденко А. Н. Тектоника и эволюция литосферы восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 667–682.

DOI: 10.17076/tm14_38

ФОРМЫ АПАТИТА В РУДАХ ХИБИНСКОГО МАССИВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОБОГАЩЕНИЕ

Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. К., Чернявский А. В.

ГИ ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

Апатит, важнейший промышленный минерал, постоянно привлекает внимание исследователей с различных позиций [7, 9, 4, 5, 6, 8, 3, 16, 15, 14, 12, 18, 11]. Наибольшее количество работ посвящено исследованиям химического состава апатита, как уникального коллектора стронция и редких земель, а также морфологии кристаллов, минеральным ассоциациям и генезису. В данной работе рассмотрены новые аспекты связи морфоструктурных особенностей апатита с технологическим процессом.

Общие сведения

Апатит – $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3\text{F}$ – основное полезное ископаемое Хибинских тундр. Минерал присутствует во всех породах массива в виде акцессорной примеси, в том числе: в нефелиновых сиенитах в объеме 0.26–0.34%, в рисchorритах – 0.36%, в мельтейгит-уртитях 1.68–1.87% [16]. В апатит-нефелиновых рудах содержание апатита варьирует от 10 до 100%. Акцессорный апатит в породах Хибинского массива представлен в основном призматическими зернами

размером 0.01–0.3 мм. Реже встречаются игольчатые кристаллы размером 0.1–4 мм. Зерна апатита располагаются в виде включений в порообразующих минералах по краям зерен. Взаимоотношение апатита с порообразующими минералами имеет преимущественно реакционный характер. Коррозионные структуры усложняются в ряду: апатит-нефелиновые руды – титанит-apatит-нефелиновые руды – ювиты и рисчорриты. В апатит-нефелиновых рудах выделяется три разновидности апатита: сахаровидный – зерна призматического облика, размером 0.05–0.3 мм; игольчатый – в сечении 0.1–3 мм, длиной 4–25 мм и грубозернистый – размером 2–8 мм, изометричной формы. Исследования поверхности кристаллов апатита показало, что все разновидности имеют признаки совместной кристаллизации в виде ступенек роста, борозд, вициналей и др. Главными кристаллографическими формами апатита в породах и рудах являются: призма $m \{10\bar{1}0\}$, пинакоид $p \{0001\}$ и дипирамиды $x \{10\bar{1}1\}$ и $s \{11\bar{2}1\}$. Кристаллографические формы апатита усложняются с переходом в низкотемпературные ассоциации, это выражается

в увеличении числа граней, интенсивном развитии грани пинакоида $p \{0001\}$ и появлении третьей дипирамиды $n \{21\bar{3}1\}$. Вторичные формы апатита, образованные под воздействием наложенных процессов, имеют признаки дробления, чешуйчатости и развития тонкоигольчатых агрегатов желтовато-зеленого цвета.

Текстуры, структуры и минеральный состав апатит-нефелиновых руд

Апатит-нефелиновые руды делятся на 12 природных типов [17] (рис.1). В классификации использованы текстурные, морфологические, размерные и вещественные признаки.

Наиболее распространенными типами являются: линзовидно-полосчатые, брекчиевые и пятнистые руды (табл. 1, рис. 2).

В богатых рудах апатит составляет до 75% объема (рис. 1) и образует полнокристаллический агрегат, панидиоморфнозернистой структуры, в котором располагаются включения различных минералов и пород (рис. 3, 4): нефелин, пироксен, титанит, уртит, мельтейгит и другие. Средний размер зерна основного апатита составляет около 1 мм.

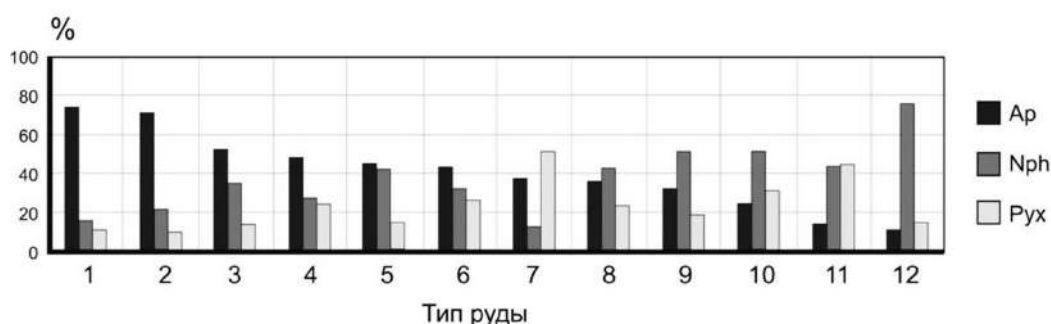


Рис. 1. Типы и минеральный состав руд Хибинских месторождений: 1 – пятнистые; 2 – пятнисто-полосчатые; 3 – полосчатые; 4 – брекчиевые; 5 – линзовидно-полосчатые; 6 – контактная брекчия; 7 – сфен-apatитовые; 8 – крупноблоковые; 9 – мелкоблоковые; 10 – сетчатые; 11 – сфеновый ийолит; 12 – уртит с апатитом. Ap – апатит; Nph – нефелин; Pux – пироксены и примеси (слюды, лампрофиллит, амфиболы и др.)

Таблица 1

Распространенность различных типов руд (%) на некоторых месторождениях Хибин [17]

Типы руд	Месторождения			
	Кукисвумчорр	Юкспор	Расвумчорр	Коашва
Пятнистые	15.2	4.4	19.0	19.4
Брекчии	5.6	41.0	28.0	11.6
Линзовидно-полосчатые	46.3	32.7	27.0	20.7
Сетчатые	10.1	1.3	0.9	–
Крупноблоковые	9.7	8.3	7.0	4.8
Уртиты с апатитом	2.2	1.0	4.0	–
Сфен-apatитовые	4.2	–	–	11.4

Рис. 2. Текстуры главных типов руд Хибинских месторождений: а – линзовидно-полосчатая, б – брекчиевая, в – пятнистая. Фото полированных штуфов

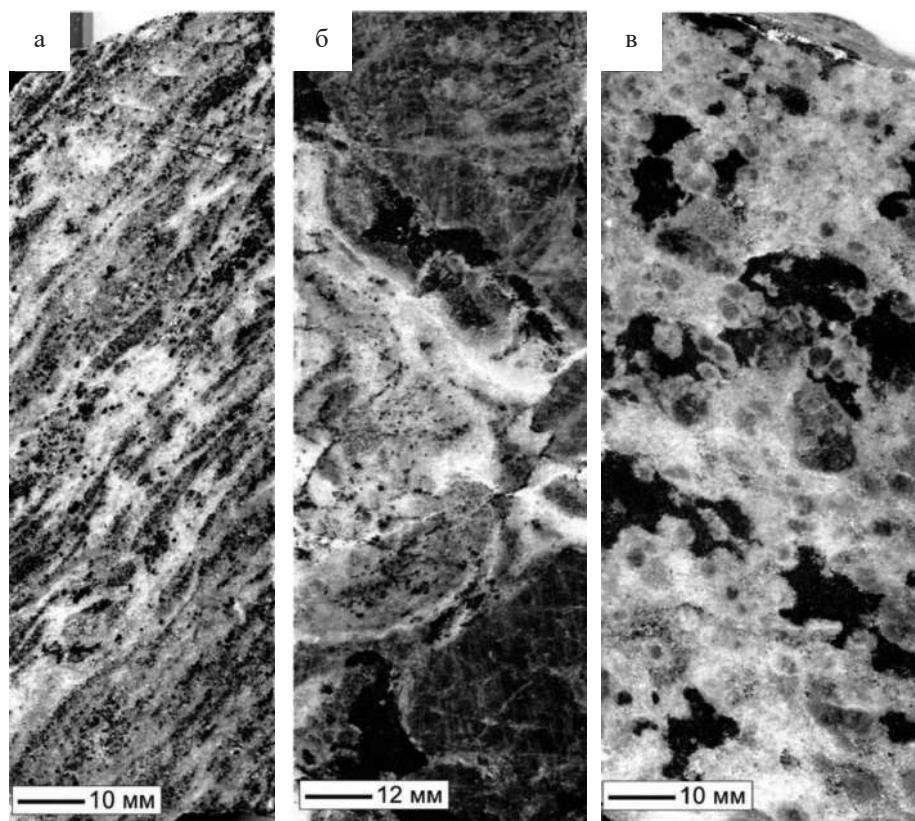
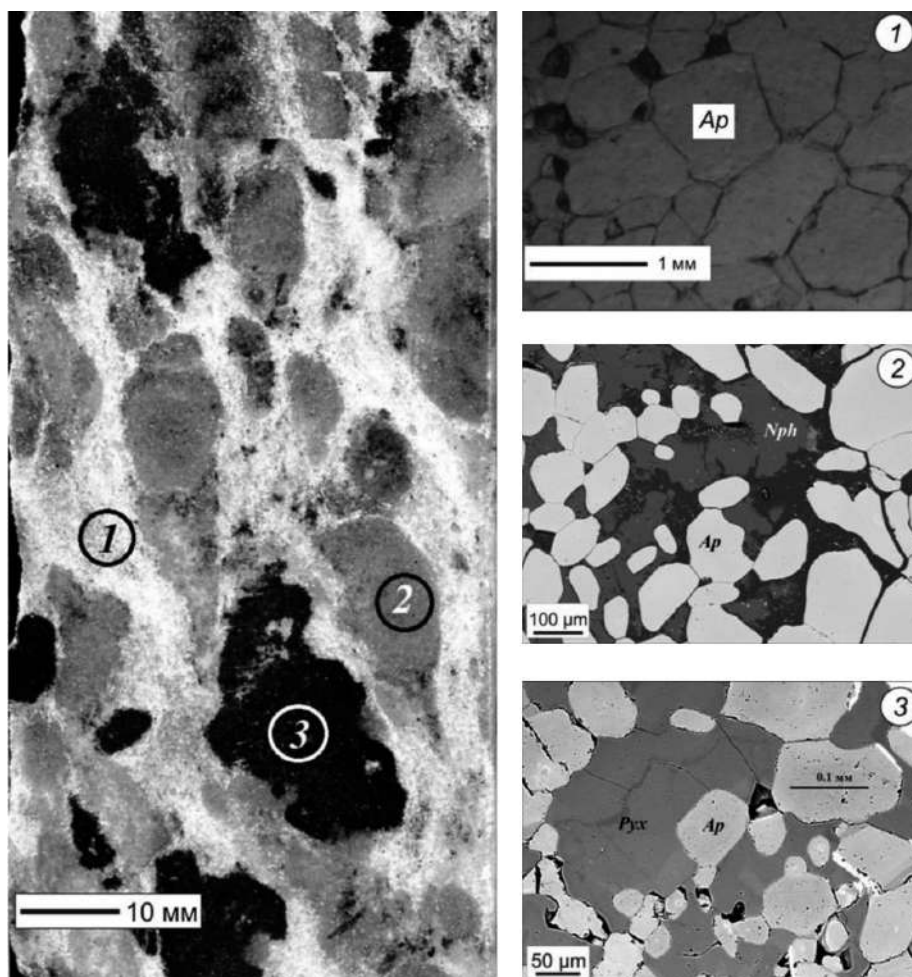


Рис. 3. Структурные особенности апатитовой руды. Области, обозначенные цифрами на изображении полированного штуфа, соответствуют фотографиям в правом столбце: 1 – основной апатит, фото в проходящем свете; 2 – включения апатита в нефелине, СЭМ изображение; 3 – включения апатита в пироксене, СЭМ изображение



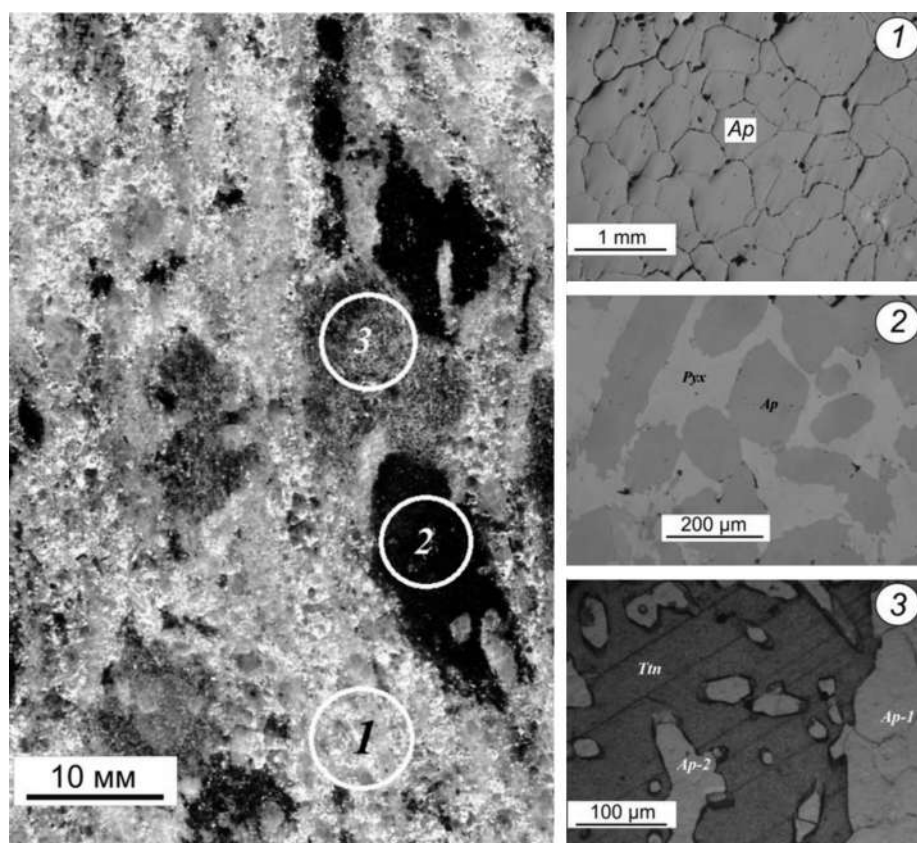


Рис. 4. Структурные особенности апатитовой руды. Области, обозначенные цифрами на изображении полированного штуфа, соответствуют фотографиям в правом столбце: 1 – основной апатит, фото в отраженном свете; 2 – включения апатита в пироксене, фото в отраженном свете; 3 – включения апатита в титаните, фото в проходящем свете

Включения в апатите других минералов представляют угловатые, округлые, линзовидные и прочие по форме выделения, распределенные равномерно или ориентировано. Они, как правило, изолированы друг от друга прослойкой апатита. Размеры включений широко варьируют в пределах 5–30 мм.

Исследования породообразующих минералов, расположенных в массе апатита, показали, что все они содержат включения апатита, более мелкие, чем зерна основного апатита (рис 3, 4). Форма этих сростаний аналогична пойкилитовым кристаллам. Размеры апатита во включениях составляют в среднем 0.2 мм, в 5 раз меньше размера зерен основного апатита. Таким образом, апатит-нефелиновые руды содержат две формы апатита: 1) основной, свободный крупнозернистый апатит и 2) «пойкилитовый», мелкозернистый апатит, включенный в нефелин, пироксен и титанит. Это вызывает определенные сложности при обогащении руд.

Особенности раскрытия апатита при измельчении апатит-нефелиновых руд

В соответствие с физическими свойствами (табл. 2), минералы должны раскрываться в последовательности: апатит, нефелин, пироксен,

полевые шпаты. Однако этого не происходит. Исследования показывают, что апатит раскрывается неравномерно и, частично, позднее нефелина и пироксена.

Опытные данные измельчения апатит-нефелиновых руд показывают, что апатит раскрывается в две стадии. Например, в работе [19] установлено, что вначале измельчения образуется два класса частиц (-0.4 и $+0.4$ мм), с почти равным распределением (51 и 49%) соответственно, в первый из которых переходит 70% апатита в раскрытой форме, во втором остается 30% апатита, в сростках с нефелином. Сростки раскрываются позднее при уменьшении размера фракции измельчения. Исследования Елбэндари А. М. [10], свидетельствуют, что раскрытие апатита хорошо идет вначале, в крупной фракции $-0.2+0.16$ мм, достигая 81% свободной фазы, а затем ухудшается во фракциях $-0.16+0.045$ до 65%. В этих фракциях отмечается рост количества биминеральных сростков апатита с нефелином и пироксенами до 26%. Дальнейший рост выхода свободного апатита происходит только при измельчении руды до фракции -0.045 мм. Данные тонкого грохочения в цикле измельчения АО «Апатит» [13] показывают, что раскрытый апатит в питании

флотации составляет около 45 % и сосредоточен во фракции –0.071 мм, остальные 55 % составля-

ют зерна и сростки апатита с порообразующими минералами во фракциях +0.071–0.400.

Таблица 2

Физические свойства минералов апатит-нефелиновых руд

Минерал	Твердость по Моосу	Твердость по Виккерсу Н, кг/мм ²	Спайность	Сингония	Плотн., ρ, кг/м ³	Модуль продольной упругости (Юнга) E, МПа	Предел прочности при одноосном сжатии, σ _{сж} , МПа	Предел прочности при растяжении, σ _р , МПа
Апатит	5	523	Несоверш хрупок	гекс	3.263·10 ³	4.34·10 ⁴	32	2.5
Нефелин	5–6	750	Несоверш Хрупок	гекс	2.635·10 ³	7.13·10 ⁴	180	19.6
Пироксен	5	822	Ясная	мон	3.563·10 ³	14.68·10 ⁴	190	22.0
Титанит	5.5	679	Ясная	мон	3.50·10 ³			
Щелочной полевой шпат	6.2	970	Соверш	трикл	2,551·10 ³	6.90·10 ⁴	220	27.3
Титано-магнетит		735	Весьма несоверш хрупок	куб	4.7·10 ³	15.20·10 ⁴		
Сода	1–1.5		Несоверш	мон	1.45·10 ³			
Содалит	5.5–6		Средняя	куб	2.22·10 ³			
Натролит	5–5.5		Средняя	ромб	2.35·10 ³	7.4·10 ⁴		
Биотит	2–3		Весьма соверш	мон	3.07·10 ³	6.9–7·10 ⁴		

Справочники: [1, 2].

Причиной сложного раскрытия апатита является наличие двух форм: крупнозернистого свободного и мелкозернистого, скрытого во включениях в пойкилобласти. Пойкилобласти рассеяны в массе свободного апатита и являются биминеральными агрегатами. Размеры их 5–30 мм, т. е. они могут появиться в продуктах измельчения в кусках разного размера. Их присутствие создает анизотропию крепости руды. До обособления пойкилобласт идет разрушение свободного апатита. Затем начинают разрушаться пойкилобласти, в соответствии с понижением прочности минералов, которые их составляют, и высвобождается мелкозернистый апатит. Пойкилобластические структуры появляются в виде твердых частиц (сростков с включениями апатита). Они тормозят раскрытие «пойкилитового» апатита и способствуют переизмельчению свободного раскрытого апатита. Размеры включений апатита в пойкилобласти в среднем 0.2 мм, поэтому они начинают раскрываться только при измельчении до –0.1 мм. Таким об-

разом, для раскрытия тонкозернистого апатита необходим более тонкий помол.

Выводы

Апатит-нефелиновые руды представляют пример технологически сложных для обогащения продуктов, вследствие сочетания особых морфо-структурных факторов и физических свойств минералов. Особенностью руд является присутствие двух форм апатита – свободного и «пойкилитового». Главный минерал, свободный апатит, имеет наиболее низкую прочность и склонен к быстрому измельчению. Присутствие пойкилобластов нефелина, пироксена и титанита с включениями апатита обуславливает необходимость дополнительной работы мельниц для измельчения более прочных минералов и раскрытия мелкозернистого апатита. В этот период происходит переизмельчение свободного апатита. Для оптимизации процесса требуется проведение мероприятий по выводу готового к флотации апатита из процесса измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Турчанинов И. А., Воларович М. П., Бондаренко А. Т., Ковалева Г. А., Медведев Р. В., Томашевская И. С., Тюремнов В. А. Атлас физических свойств минералов и горных пород Хибинских месторождений // Изд-во Наука, Ленингр. отд., Л., 1975. 71 с.
2. Бетехтин А. Г. Курс минералогии. М: Гос. науч.-тех. издат. литературы по геологии и охране недр, 1961. 539 с.
3. Боруцкий Б. Е. Существенно стронциевый апатит из Хибинских тундр // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Вып. 4. М.-Л: Наука, 1965. С. 143–151.
4. Денисов А. П., Дудкин О. Б., Елина Н. А., Кравченко-Бережной Р. А., Полежаева Л. И. О зависимости физических свойств апатита от примеси редких земель и стронция // Геохимия. 1961. № 8. С. 666–676.
5. Дудкин О. Б., Козырева Л. В., Померанцева Н. Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. М.-Л.: Наука, 1964. 235 с.
6. Дудкин О. Б., Померанцева Н. Г. Акцессорные апатит и сфен из ийолит-уртитов Хибинского массива // Материалы по минералогии Кольского полуострова. Вып. 4. М.-Л: Наука, 1965. С. 132–142.
7. Дудкин О. Б. Новые данные по минералогии хибинского апатита // Материалы по минералогии и металлогении Кольского полуострова. Вып. 1. Апатиты: КФ АН СССР, 1970. С. 267–272.
8. Дудкин О. Б., Пахомовский Я. А., Ганнибал Л. Ф. Тонкораспыленный апатит в силикатах щелочных пород // Материалы по минералогии и геохимии щелочных комплексов пород Кольского полуострова. Апатиты: КФАН СССР, 1975. С. 183–190.
9. Дудкин О. Б. Технологическая минералогия комплексного сырья на примере месторождений щелочных плутонов. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 1996. 134 с.
10. Елбэндари А. М. Повышение комплексности переработки фосфатных руд флотационным методом // Дисс. к.т.н., Санкт-Петербург, 2021. С.-Петербургский горный университет. 134 с.
11. Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Методика прогнозирования обогатимости апатитовых руд (Кировский рудник, Кольский полуостров) // Обогащение руд. 2022. № 1. С. 27–30.
12. Калугин А. И. Исследование и обоснование оптимальных условий селективной флотации апатита из апатито-нефелиновых руд. Дисс. к.т.н. 2002. 150 с.
13. Калугин А. И., Гумениченко К. М., Барабаш А. Ю., Арсентьев С. С. Опыт внедрения технологии тонкого грохочения в цикле измельчения апатит-нефелиновой руды // Горный журнал. 2014. № 10. С. 52–57.
14. Когарко Л. Н. Редкоземельный потенциал апатита в месторождениях и отходах производства апатито-нефелиновых руд Хибинского массива // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2019. Т. 16. С. 271–275.
15. Коноплева Н. Г., Иванюк Г. Ю., Пахомовский Я. А., Яковенчук В. Н., Михайлова Ю. А. Типоморфизм фторапатита в Хибинском щелочном массиве (Кольский полуостров) // ЗРМО. 2013. № 3. С. 65–83.
16. Костылева-Лабунцова Е.Е., Боруцкий Б. Е., Соколова М. Н., Шлюкова З. В., Дорфман М. Д., Дудкин О. Б., Козырева Л. В. Минералогия Хибинского массива (минералы). Т. 2. М.: Наука, 1978. 586 с.
17. Минеральные месторождения Кольского полуострова / Г. И. Горбунов и др. Л.: Наука, 1981. 272 с.
18. Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. А., Байбикова Ю. Б., Базай А. В. Исследование структурно-химических особенностей фторапатита Хибинского массива как потенциального сырья для обогащения // Обогащение руд. 2020. № 4. С. 14–20.
19. Ракаев А. И., Чепкаленко Н. А. Интенсификация цикла рудоподготовки при комплексном обогащении апатито-нефелиновых руд // Серия: Инновационный потенциал Кольской науки. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2005. С. 106–111.
20. Романчев Б. П., Когарко Л. Н., Каменев Е. А., Шевалеевский И. Д. Генетические типы апатита коашвинского месторождения // Труды минералогического музея им. А. Е. Ферсмана. 1975. Вып. 24. С. 207–211.

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА В ПРОДУКТАХ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАЙСКОЕ

Долотова А. В., Анисимов И. С., Харитонов М. С., Агапов И. А.

АО «Полиметалл Инжиниринг», Санкт-Петербург

Золоторудное месторождение Майское располагается в Чаунском районе Чукотского автономного округа на северо-востоке России. Золото-пирит-арсенопиритовая минерализация в кварцевых жилах и штокверках, пространственно связана с дайками порфиров кислого состава ранне-позднемиоценового возраста. Вмещающими породами являются среднетриасовые углеродсодержащие алевриты и песчаники. Околорудные изменения представлены бе-

резитизацией, хлоритизацией и каолинтизацией. Золото в зоне окисления выявлено как в свободной, так и в сульфидно-связанной форме.

Объектами исследования послужили 3 продукта фабричной переработки окисленной руды месторождения Майское по комбинированной технологии: питание флотации (исходная руда; П-ЗИФ), хвосты флотации (ХвФл) и кек цианирования хвостов флотации (Хв СЛ) (рис. 1).

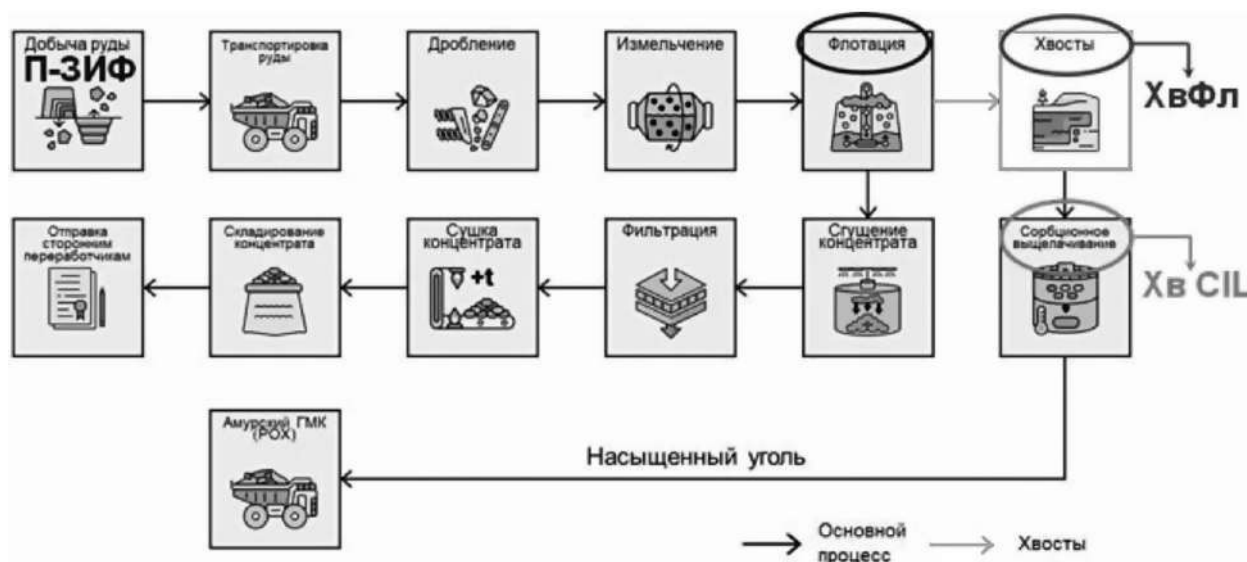


Рис. 1. Блок-схема золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ) Майское

В работе использовались количественный порошковый рентгенофазовый анализ, оптическая и электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгенофлуоресцентный и пробирный анализы.

Минеральный состав проб практически неизменен (рис. 2). Главными минералами являются кварц и слоистые силикаты. Количество породообразующих минералов (кварц, полевые шпаты, слоистые силикаты) примерно одинаковое как в пробе питания флотации, так и в продуктах пере-

работки. Второстепенные минералы представлены скородитом, ярозитом, сульфидами и другими. Содержание природного угля составляет 0.4–0.5%. Суммарное количество сульфидов в пробе питания флотации составляет 0.5%, в продуктах переработки – 0.3% (рис. 3). В хвостах флотации количество сульфидов ниже в 1,6 раз. Количество скородита в хвостах флотации уменьшилось в 2 раза по сравнению с питанием флотации. Очевидно, основная масса сульфидов и скородита были извлечены в флотационный концентрат.

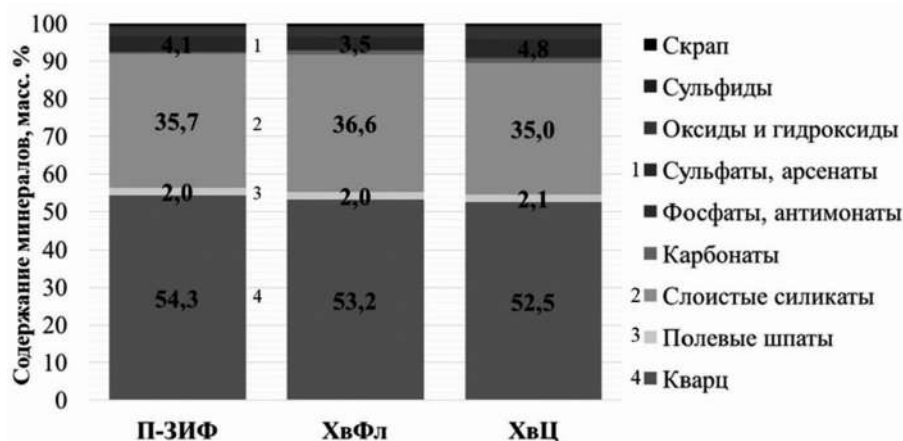


Рис. 2. Общий минеральный состав проб продуктов переработки ЗИФ месторождения Майское

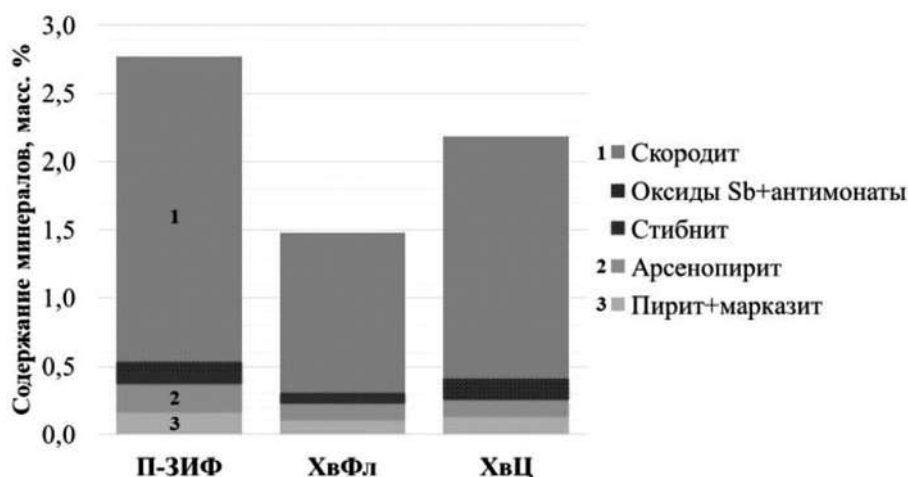


Рис. 3. Содержание сульфидов, скородита и окисленных форм сурьмы в пробах продуктов переработки ЗИФ месторождения Майское

В руде представлено как видимое, так и невидимое золото. На приведенных оптических и электронных фотографиях проиллюстрированы свободные зерна самородного золота, а также сростки с стибнитом, стибиконитом, трипугиитом и скородитом (рис. 4). Оставшиеся в хвостах цианирования золотины покрыты окисленными минералами сурьмы.

Кроме этого в хвостах флотации обнаружены сростки самородного золота с ярозитом и его тонкие включения размером менее 1 микрона в скородите и ярозите (рис. 5). Эти включения могут быть одной из основных причин низкого извлечения золота из руды и из флотационного концентрата.

Наблюдаемые частицы золото-серебряно-го сплава имели пробность от 804‰ до 993‰ (рис. 6). Высокопробное (> 900‰) самородное золото обнаружено во всех продуктах ЗИФ

Майское. В хвостах флотации самородное золото является высокопробным (980‰), в хвостах цианирования и питании флотации пробность золота ниже (910‰ и 920‰, соответственно). По результатам рентгеноспектрального микроанализа золото содержит примеси серебра и железа. Анализ краевых частей свободных золотинок показал повышенные содержания железа и сурьмы, это говорит о том, что поверхность золотинок может быть покрыта оксидами этих элементов.

Наблюдаемое самородное золото в исследуемых пробах находилось как в свободном виде, так и в открытых сростках с пиритом, марказитом, скородитом, ярозитом и окисленными формами сурьмы (преимущественно с трипугиитом) и в закрытых сростках со скородитом и окисленными формами сурьмы, а также в пленках скородита и ярозита.

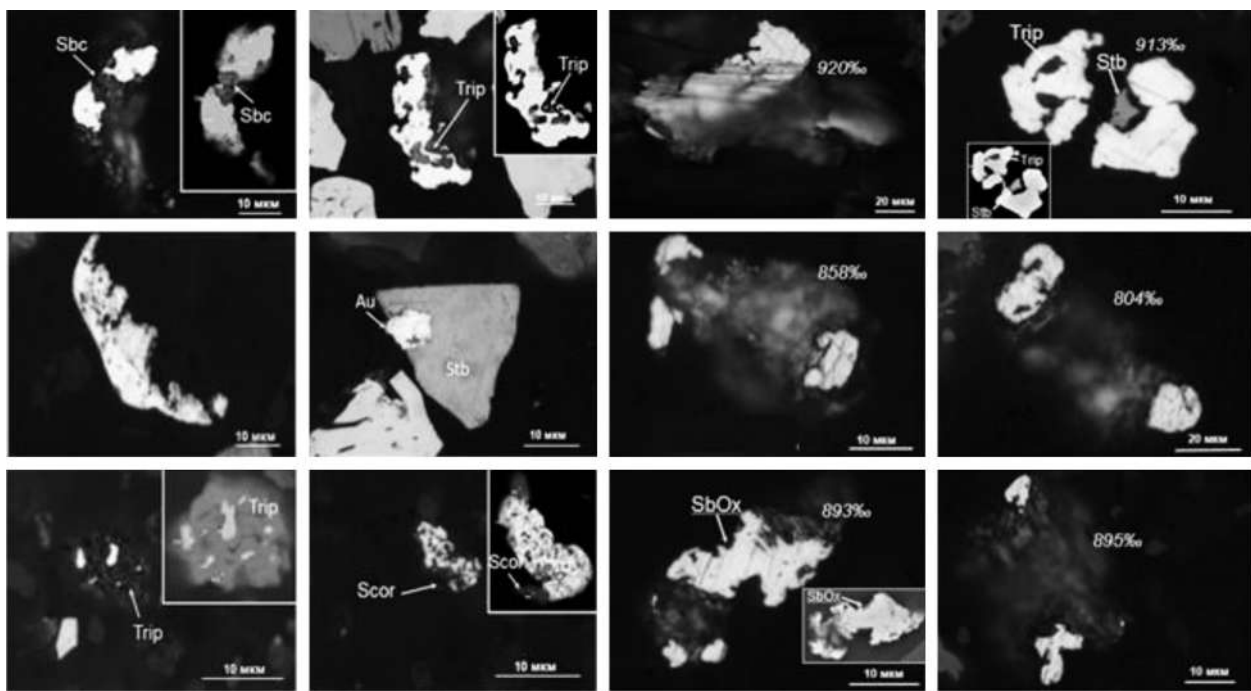


Рис. 4. Оптические фотографии золота с корками окисленных минералов сурьмы в руде (слева) и хвостах цианирования (справа) ЗИФ Майское

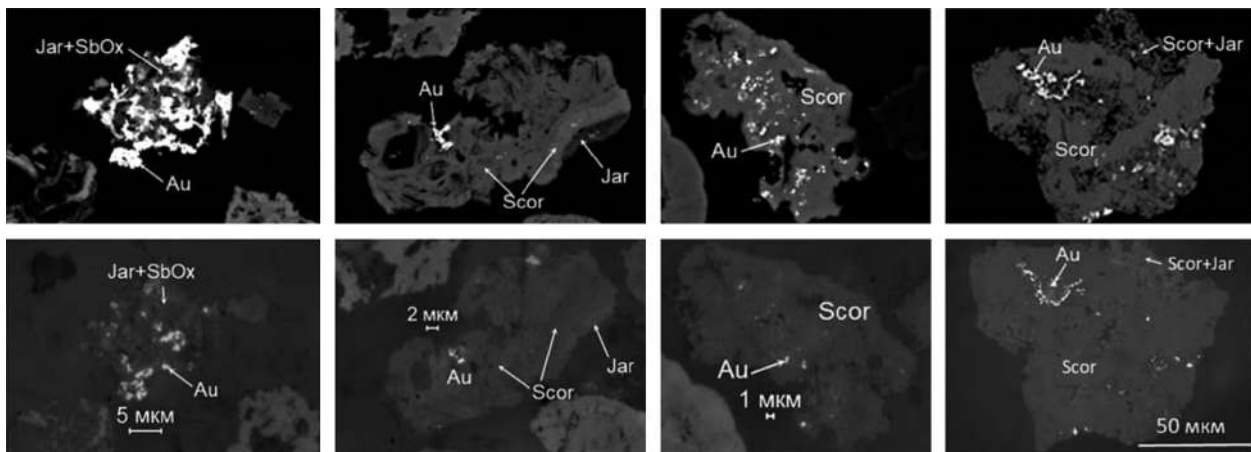


Рис. 5. Оптические и BSE фотографии упорного золота в ярозит-скородитовых агрегатах и скородите в хвостах флотации и цианирования ЗИФ Майское

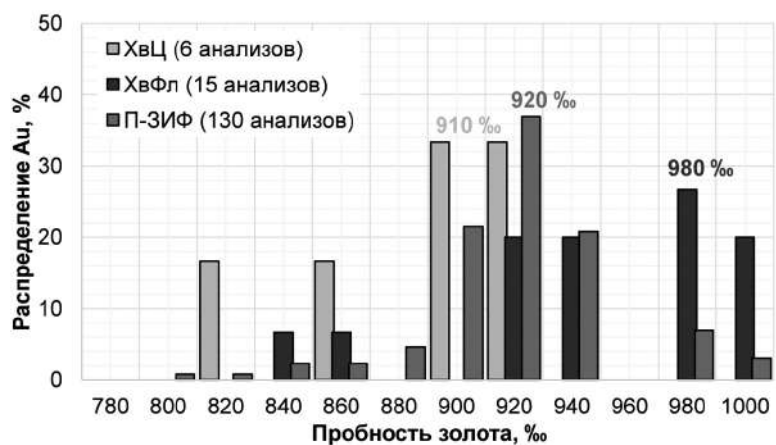


Рис. 6. Состав самородного золота в продуктах ЗИФ Майское по результатам 151 анализа

Распределение массы золотин по размеру для продуктов показано на сравнительной гистограмме (рис. 7). Характер распределения размера частиц видимого самородного золота различен для продуктов. В пробе питания флотации ЗИФ на крупные золотины (≥ 100 мкм) приходится

около 17% массы наблюдаемого золота, остальная часть зерен имеет крупность менее 60 мкм (83%). В пробе хвостов флотации ЗИФ отсутствуют крупные золотины. В кеке цианирования присутствует как крупное золото (≥ 75 мкм), так и мелкое (< 45 мкм).

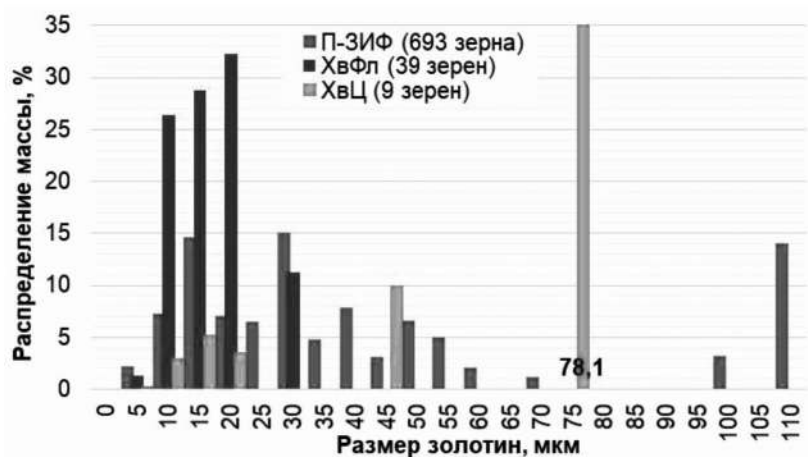


Рис. 7. Сравнительное распределение массы частиц видимого самородного золота по размеру в продуктах переработки ЗИФ Майское (всего 741 золотины)

Кроме собственных минеральных фаз, которые присутствуют в пробах, золото содержится в природном угле. Около одной пятой золота в пробе питания флотации (18.5%) связано с природным углем. Уголь в руде встречается как в свободной форме, так и в бедных сростках с нерудными минералами и сульфидами (рис. 8). Большая часть угля и золота, связанного с ним, содержится в сростках с нерудными минералами.

Наибольшее количество угля находится в пробе питания флотации — 0.5%. В продуктах переработки ЗИФ его содержание примерно оди-

наковое и составляет 0.3–0.4%. Наибольшее количество золота, связанного с углем, находится в пробе питания флотации и составляет 1.3 г/т, большая часть которого связана с углем в сростках с нерудными (0.7 г/т). В хвостах флотации около 0.4 г/т золота связано с углем в сростках с сульфидами, в кеке цианирования большая часть золота связана с углем в сростках с нерудными минералами.

Содержание угля в хвостах флотации на 36% ниже, чем в питании. В процессе цианирования хвостов флотации происходит истирание частиц природного и активированного

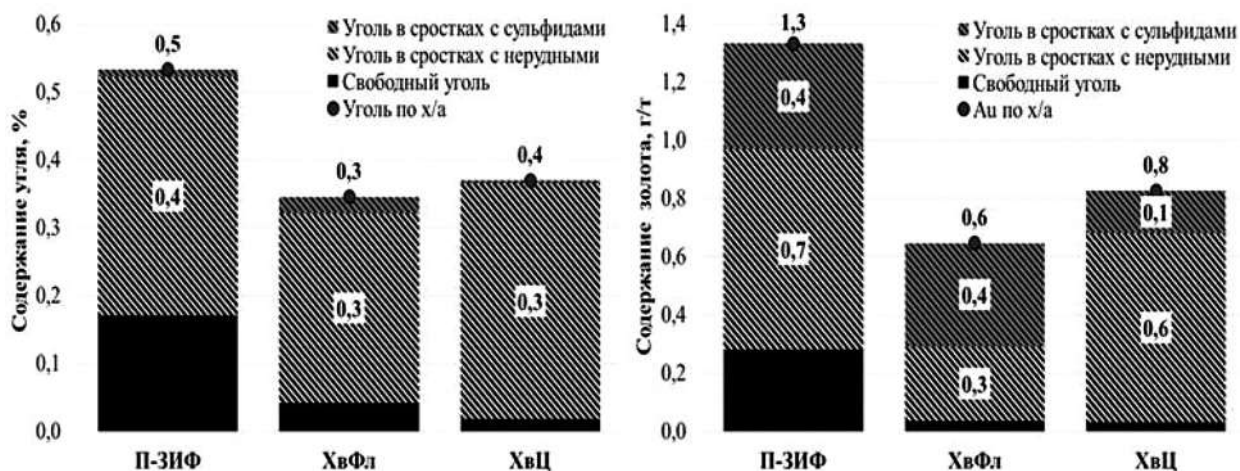


Рис. 8. Содержание природного угля (слева) и золота в свободном и связанном угле (справа) в продуктах переработки ЗИФ месторождения Майское

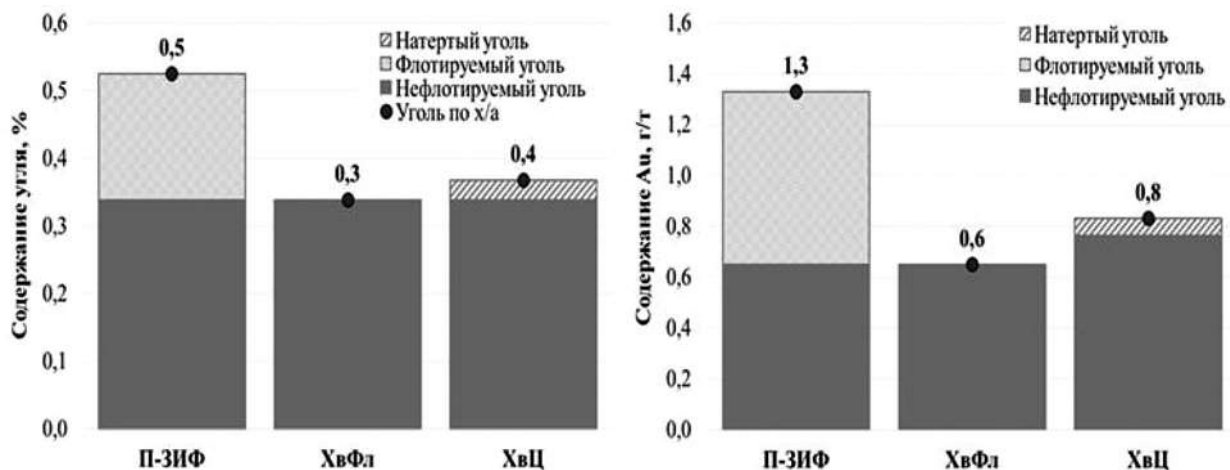


Рис. 9. Количество натертого и флотируемого угля (слева) и содержание золота, связанного с флотируемым и натертым углем (справа) в продуктах переработки ЗИФ месторождения Майское

угля за счёт чего содержание угля в хвостах цианирования выше, чем в хвостах флотации (рис. 9). Содержание золота в руде, связанного с флотируемым углем, составляет 0.7 г/т, а с натертым углем – около 0.1 г/т.

Кроме собственных минеральных фаз, которые присутствуют в пробах, и золота, связанного с углем, золото содержится в рассеянном виде в свободных от сростков минералах-носителях таких как: пирит, арсенопирит, скородит, стибнит, окисленные формы сурьмы (трипугит, стибиконит) и в этих же минералах-носителях в нераскрытых бедных сростках с нерудными минералами (рис. 10).

Основная часть золота пробы питания флотации при переработке окисленной руды заключе-

на в сростках с нерудными минералами (36%) и в скородите (36%). Содержание видимого самородного золота в пробе составляет 2.4%. С сульфидами связано 7% металла в руде, а с углем 19%. Основная часть золота в пробе хвостов флотации заключена в сростках с нерудными минералами (58.8%) и в скородите (23,9%). Относительно небольшая часть металла находится в угле (11.4%). Около 38% металла, связанного с углем, флотируется.

Основные потери при прямом цианировании хвостов флотации связаны с золотосодержащими сульфидными минералами, которые находятся в закрытых сростках с нерудными минералами (36%), скородитом (25%), природным углем (25%), золотосодержащими сульфидными минералами (10%). Часть золота (9%),

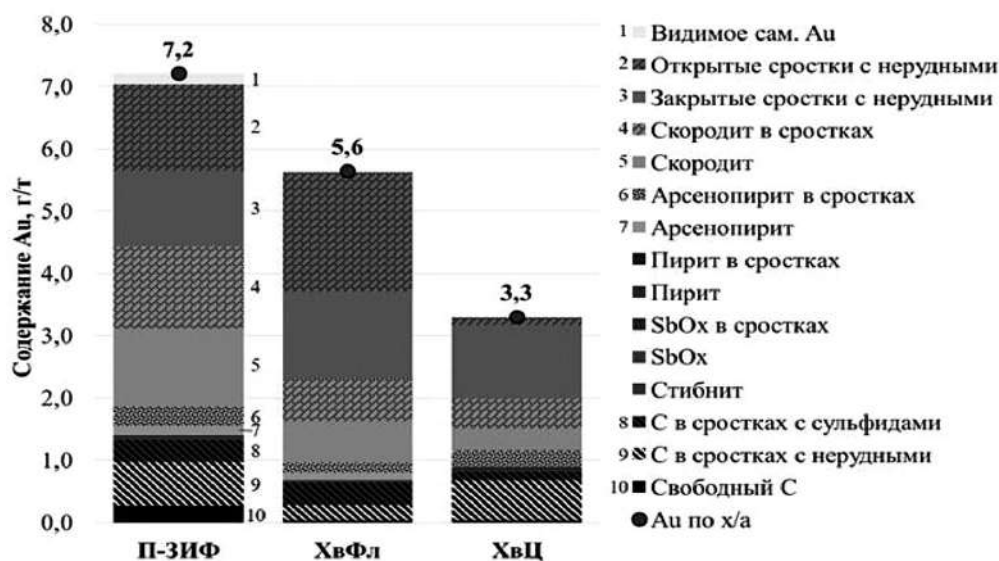


Рис. 10. Распределение содержание золота по минералам-носителям в продуктах переработки окисленной руды на ЗИФ месторождения Майское

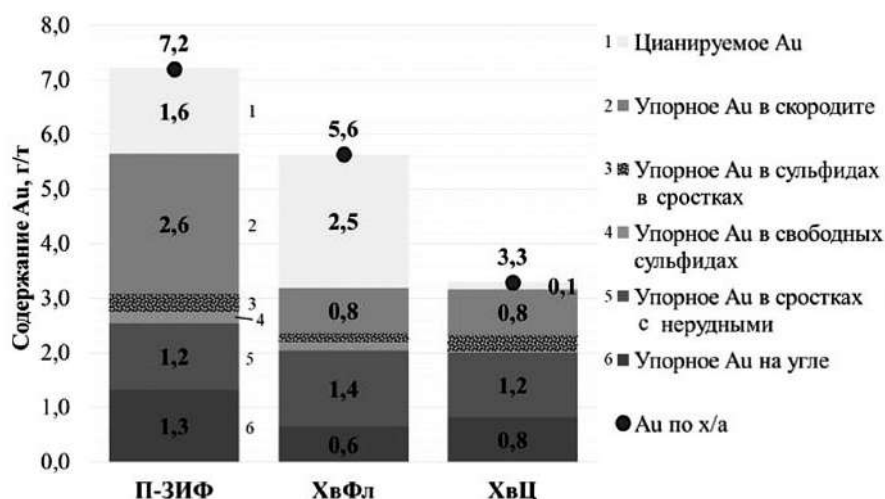


Рис. 11. Распределение содержания цианируемого и упорного золота по минералам-носителям в продуктах переработки окисленной руды месторождения Майское

связанного со скородитом цианируется. Это происходит, вероятно, за счет растворения скородита в щелочных растворах.

Расчет содержания золота по формам нахождения показал, что в пробе питания флотации цианируемое золото составляет 22 %, остальное золото упорное и содержится в скородите (36 %), сульфидах (7 %), в сростках с нерудными минералами (17 %) и в угле (19 %). Извлечение видимого самородного золота из хвостов флотации составляет 72 %, а из заключенного в скородите цианируется 38 % золота (рис. 11).

Очевидно, что цианируется видимое самородное золото, невидимое золото из сростков с нерудными минералами и часть золота, связанного со скородитом. Золото, связанное с сульфидами, не подвергается извлечению прямым цианированием, потери с ними составляют около 12 %.

Заключение

1. Золото в пробе питания флотации ЗИФ при переработке окисленных руд представлено как видимым высокопробным золотом, небольшая часть которого имела гравитационную крупность, так и невидимым (коллоидным <0.5 мкм) золотом.

2. Окисленная руда 1-ой рудной зоны месторождения Майское относится к дважды упорным, так как большая часть золота является невидимой и рассеянной в сульфидах, скородите, окисленных формах сурьмы и сорбируется на угле при цианировании.

3. Основная часть потерь металла с хвостами флотации ЗИФ связана со сростками сульфидов с нерудными минералами и скородитом. Также потери самородного золота с хвостами флотации связаны с нефлотируемыми частицами самородного золота, покрытыми пленками окисленных минералов сурьмы и мышьяка и золотинами с низким содержанием серебра. Потери золота, заключенного в арсенопирите, связаны с тонкой вкрапленностью арсенопирита в нерудных минералах.

4. Основная масса золота, теряемого с хвостами цианирования ЗИФ, связана со скородитом, природным углем, нерудными минералами и золотосодержащими сульфидами, которые находятся в сростках с нерудными минералами и в свободных зернах. Ведется поиск реагентного режима для извлечения флотацией/цианированием золота, связанного с окисленными минералами мышьяка и серы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вещественный состав и формы нахождения золота в продуктах переработки окисленной руды первой рудной зоны месторождения Майское на ЗИФ МГК (технологические пробы Т-497 – 1, 2, 3). Отчет о научно-исследовательской работе. ДНТИ Полиметалл Инжиниринг. 2019.

2. Артемьев Д. С. Особенности геологического строения и вертикальной зональности рудных тел Майского золоторудного месторождения (Центральная Чукотка) // Региональная геология и металлогения. 2015. № 64. С. 94–100.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ И МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ АЛЬБИТИТОВ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НОВЫЕ ПЕСКИ (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

Кевлич В. И.¹, Фролов П. В.¹, Тытык В. М.², Мاستрюкова С. В.¹

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск

² ООО «Онего-Золото», Петрозаводск

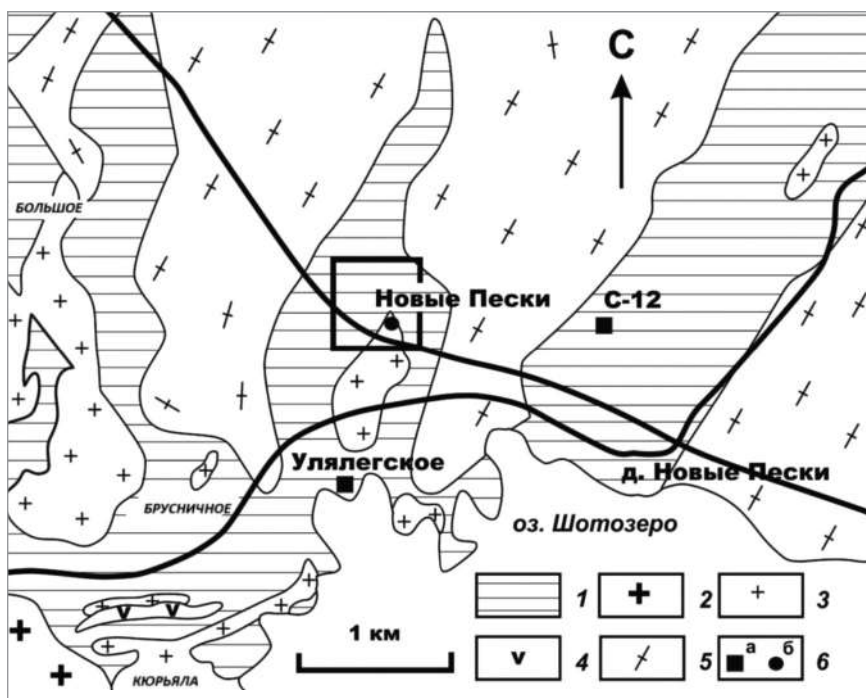
В настоящее время основной стратегией применения минерально-сырьевых материалов в мире является инновационный тренд развития, создания технологий и горных предприятий, позволяющих решать на современном уровне задачи обеспечения всем комплексом минерально-сырьевых ресурсов потребности современного и будущего промышленности. Разработка и поиски инновационных способов переработки минерального сырья Карелии является одной из важных задач.

Краткая история изученности золоторудного месторождения Новые Пески

Улягское поле гранитных пегматитов Южной Карелии расположено примерно в 100 км к западу от Петрозаводска. Наиболее крупные пегматитовые тела, опоискованные и разведанные в разные годы, представлены месторождениями полевошпатового сырья Большое,

Брусничное, Кюрьяла [4, 5, 8]. Самое большое из них – Кюрьяла, разведывалось как сырьевая база Кондопожского пегматитового завода, для получения маложелезистых концентратов из плагиоклазовых пегматитов для стекольной промышленности и микроклиновых – для электротехнического фарфора. Работами Карельской геологической экспедиции в Улягской структуре южной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса, в 650 м севернее оз. Шотозеро, было выявлено в 1988 г. золоторудное метаморфогенное (метаморфогенно-гидротермальное) месторождение Новые Пески (рис. 1) золото-сульфидной формации, которое локализовано в апогабброидных амфиболитах шотозерской толщи лопия, слагающих субмеридиональную троговую структуру размерами 3×20 км, срезаемую в южной части Улягским массивом гранитов рапакиви возрастом 1.54 млрд лет [10, 3]. С 2007 г. объект разведывался ООО «Онего-

Рис. 1. Схема геологического строения Улягской зеленокаменной структуры (по данным В. В. Сиваева, А. Ф. Горошко, Л. В. Кулешевич, В. М. Тытыка, упрощено): 1 – зеленокаменные породные комплексы (шотозерская толща); 2 – граниты рапакиви; 3 – граниты и пегматиты виртаойского комплекса; 4 – габбро-амфиболиты; 5 – гранито-гнейсы, 6 – рудопроявления: а – колчеданные, б – золоторудное. Большое, Брусничное, Кюрьяла – месторождения пегматитов Улягского рудного поля



золото», с утверждением в ГКЗ запасов категории C_2 : руды 230 тыс. т, золота 1077 кг, ресурсы золота оценены по категории P_1 5.8 т. Попутным полезным ископаемым является мышьяк (арсениопирит). Вскрыша пригодна для производства дорожного щебня. Вмещающие зеленокаменные породные комплексы могут быть перспективны и на магнезиальное сырьё [9].

Пегматоидные образования золоторудного месторождения Новые Пески

Установлено, что в пределах месторождения Новые Пески вмещающие амфиболиты секутся мелкими пегматитовыми жилами и дайкообразными телами. Пегматиты являются здесь наиболее поздними образованиями. Скважинами были вскрыты жилы олигоклазовых и микроклиновых пегматитов мощностью 1–5, иногда до 15–30 м. В контуре карьера отмечены мало-мощные жилки (первые десятки сантиметров, до метра) и обособления неправильной формы кварц-альбитовых образований (рис. 2), по по-

лученным нами предварительным данным несущие редкометалльную и редкоземельную минерализацию (цирконий, ниобий, гафний, церий и др.). Отмеченные образования являются, очевидно, альбититами генетического класса альбититы-грейзены [1]. Вероятно, здесь имеют место фрагменты штокообразного рудного тела – жилы альбитито-грейзенового комплекса в форме штокообразных залежей. Граниты, принадлежащие к малым многофазным гипабиссальным интрузиям, являются источниками редкометалльной минерализации. В модели образования существенную роль играют «волны» кислотности-щелочности и фильтрационный эффект, связанный с пневматолито-гидротермальными флюидами.

В контуре карьера Новые Пески в основной массе кварц-альбитовые образования выглядят как недифференцированные, но встречаются и зональные жилы (мощностью до 1 м) с кварцевой осью. Визуально это породы серо-коричневого цвета средне-крупнозернистые (рис. 3).

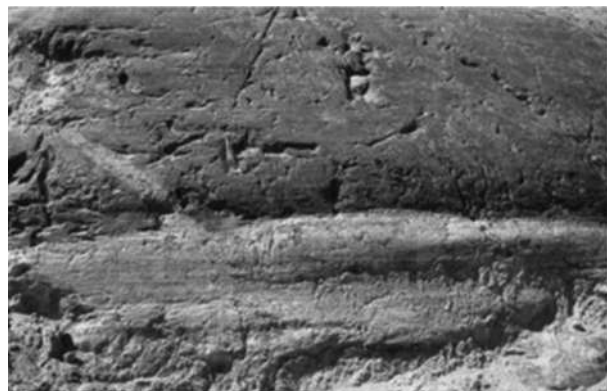
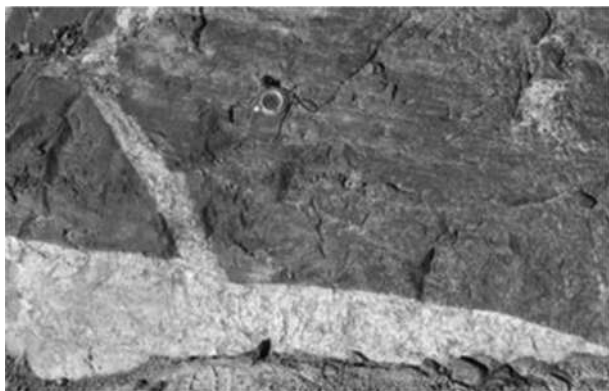


Рис. 2. Жилы альбититов с апофизами, секущие вмещающие амфиболиты (расчистки в контуре золоторудного карьера Новые Пески)



Рис. 3. Образцы кварц-альбитов золоторудного месторождения Новые Пески

Методика исследований

Для выявления, диагностики и пространственного распределения минералов-концентратов РЗЭ проводилось визуально-минералогическое изучение горных пород непосредственно на объекте, с последующим изучением проб альбититов месторождения Новые Пески комплексом минералогических, физико-химических и обоганительных методов (метод протокочек, выделение и анализ тяжелой и легкой фракций, выделение мономинеральных фракций с применением магнитной, электрической сепараций, метода тяжелых жидкостей). Схема подготовки проб для аналитических исследований включает стадийное дробление, измельчение, рассев, квартование на различные виды анализов (рентгенофлуоресцентный, рентгено-фазовый (РФА), ICP-MS) (рис. 4), с определением минералов, их морфологии, размерности, содержания компонентов в минералах-конcentраторах. Проведено изучение шлифов, аншлифов, шлихов на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Teskan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments). Для количественного рентгено-флуоресцентного анализа пробы приготовлены методом сплавления. Концентрации редких и редкоземельных элементов определялись методом ICP-MS на квадрупольном спектрометре Thermo Scientific XSeries 2 по стандартной методике [6]. Разложение образцов проводилось путем кислотного вскрытия в открытой системе. Правильность измерений контролировалась путем анализа стандартных

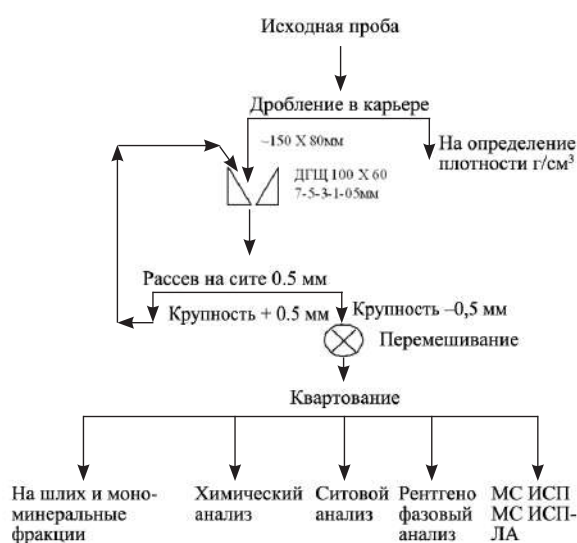


Рис. 4. Схема пробоподготовки навесок для аналитических исследований

образцов BVHO-2 и СГД-2А. Относительное стандартное отклонение для большинства элементов не превышало 5%, для V, Ba, Th составляло от 5 до 7%, для Sc и Ce – 9%.

Результаты и обсуждение

По данным РФА, главными породообразующими минералами изучаемых пород являются альбит и кварц. В небольшом количестве наблюдаются амфибол, биотит и акцессорные минералы. Размеры зёрен плагиоклаза и кварца, визуально, от 1–5 до 10 и более миллиметров. Результаты количественного рентгенофлуоресцентного анализа пробы альбититов объекта Новые Пески (вес. %): SiO_2 – 79.55; Al_2O_3 – 11.60; $\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ.}}$ – 1.16; Na_2O – 5.89; CaO – 0.85; K_2O – 0.05; MgO – 0.12; MnO – 0.06; TiO_2 – 0.05; P_2O_5 – 0.02; S – 0.00; п.п.п. – 0.17; сумма – 99.52. Мультиэлементные спектры и спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту (C_1) и примитивной мантии (PM) [11], представлены на рисунке 5. Имеет место слабое обогащение крупноионными литофильными элементами (LILE), такими как Rb, Ba и La, проба

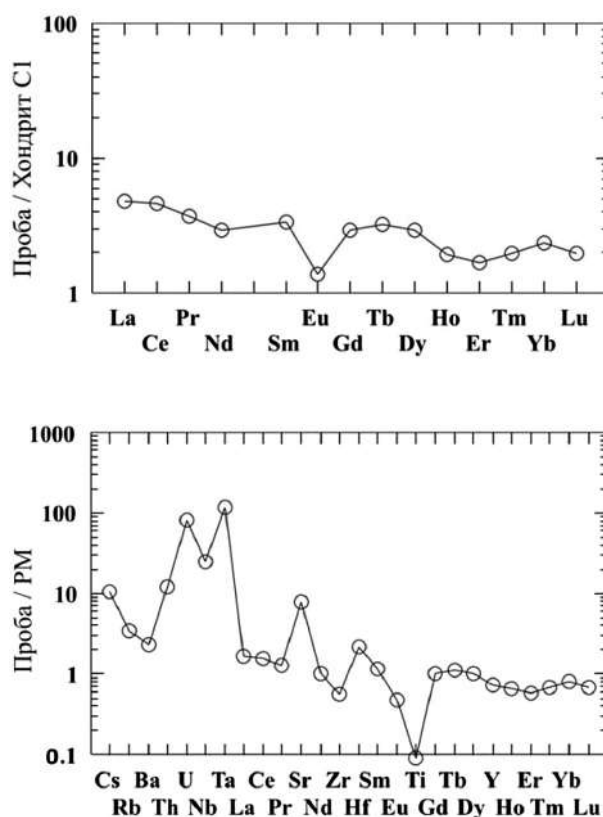


Рис. 5. Спектр распределения РЗЭ и мультиэлементная диаграмма для пробы альбититов объекта Новые Пески

сильно обеднена титаном и обогащена Pb, Th и U при наличии положительной Ta-Nb аномалии, что определяется присутствием в породе минералов – концентраторов этих элементов. Альбититы характеризуются суммарным содержанием РЗЭ – 8.6 г/т при слабо дифференцированном спектре их распределения (CeYbN – 1.97). Наблюдается отрицательная европиевая аномалия ($Eu^* - 0.44$), определяемая, очевидно, очень низким содержанием кальциевой (анортитовой) составляющей в альбите.

В результате наших исследований в пробах выявлены минералы-концентраторы ниобия (Nb), тантала (Ta), урана (U), циркония (Zr), гафния (Hf), иттрия (Y), скандия (Sc), цезия (Cs), гадолиния (Gd), неодима (Nd) – титано-тантало-ниобаты (фергусонит $Y(Nb, Ta)_4O_4$, эшинит $(Ce, Th)(Ti, Nb, Ta)_2O_6$, колумбит $(Fe, Mn)Nb_2O_6$, эвксенит-поликраз $(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$, пирохлор $(NaCa)_2Nb_2O_6(OH, F)$, тапиолит (Fe, Mn)

$(Nb, Ta)_2O_6$), настуран (уранинит) UO_2 , перовскит $CaTiO_3$, ильменит-гемоильмениты $FeTiO_3 - Fe_2O_3$, апатит $Ca_{10}(PO_4)_6(OH, F, Cl)_2$, циркон $ZrSiO_4$, бастнезит $(Ce, La, Y)CO_3F$, соотношение их существенно варьирует (рис. 6).

Выявление концентраций редких металлов и редкоземельных элементов в альбититах является не только объектом минералогических исследований, но в перспективе может иметь и промышленное значение. Учитывая, что золоторудное месторождение Новые Пески примыкает к Улягскому полю пегматитов, геохимически не изученному на редкометалльные минералы и РЗЭ, постановка ревизионных работ на этих площадях геологического, минералогического, технологического изучения обнадеживает на выявление редкометалльных, рассеянных и редкоземельных элементов. Это позволит рассматривать пегматитовые месторождения как комплексные,

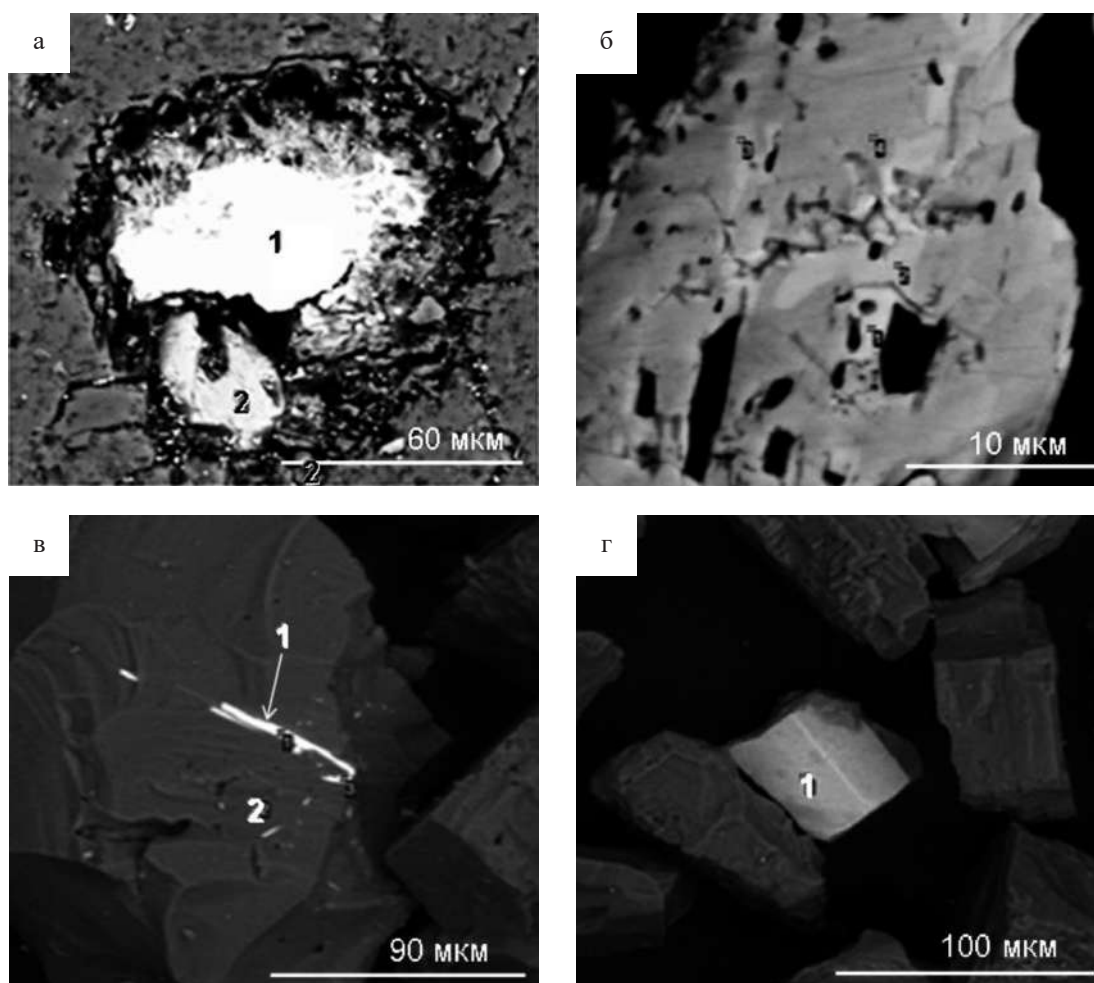


Рис. 6. BSE изображения минералов-концентраторов редких металлов и РЗЭ в альбититах месторождения Новые Пески: а – фергусонит (1) и редкоземельный апатит (2); б – зерно колумбита с включениями амфибола; в – микрожилка настурана (1) в кварце (2); г – зерно циркона (1) в шлихе

а не только как источник на кварц-полево-шпатовое сырьё. В перспективе выявление и прогноз приращения на редкометалльные минералы и РЗЭ связан и с Улягским массивом гранитов рапакиви, непосредственный контакт которых с пегматитами установлен в пределах месторождения Кюрьяла. Граниты рапакиви Улягского массива по принятой классификации [5, 7 и др.] относятся к равнозернистым биотитовым гранитам рапакиви второй фазы Салминского массива, где отмечается наибольшая концентрация редких и акцессорных минералов, среди них ортит, фергусонит, эшенит, ксенотим, пирохлор, бастнезит, циркон, монацит, топаз, берилл, касситерит, гранат, флюорит [2].

Выводы

Выявленная специфика редкометалльной и редкоземельной минерализации альбититов, вскрытых в карьере золоторудного месторождения Новые Пески, расширяет возможности комплексного использования минерального сырья объекта и перспективы поисковых работ на различные виды полезных ископаемых в пределах Улягского рудного поля.

Авторы выражают благодарности В. В. Щипцову (ИГ КарНЦ РАН) за научные консультации при подготовке материалов и А. В. Чистякову (ИГЕМ РАН) за помощь в интерпретации аналитических данных.

Работа выполнена в рамках госзадания КарНЦ РАН, тема НИР № 121040600173-1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Игнатов П. А., Старостин В. И. Геология полезных ископаемых. Учебник. М: Изд. МГУ, 2004. 512 с.
2. Калита А. П. Редкоземельные пегматиты Алакуртти и Приладжоя. Изд-во Академии наук СССР, 1961. 117 с.
3. Ларин А. М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб: Наука, 2011. 402 с.
4. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Кн. 2 / Под ред. В. П. Михайлова, В. Н. Аминова. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.
5. Пекки А. С., Разоренова В. И. Месторождения полевошпатового сырья Карелии. Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1977. 152 с.
6. Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю. и др. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды КарНЦ РАН, 2015. № 7. С. 54–73.
7. Свириденко Л. П. Петрология Салминского массива гранитов рапакиви (в Карелии). Петрозаводск, 1968. 116 с.
8. Сиваев В. В., Горошко А. Ф., Магницкая Т. Э. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые

Улягского массива гранитов рапакиви и его обрамления. Отчет о результатах геологической съемки масштаба 1 : 50000 и среднемасштабного глубинного геологического картирования, проведенных Ведлозерской партией в 1983–1988 гг. в Южной Карелии. Петрозаводск: КГЭ, 1988. Карельский ТФГИ.

9. Фролов П. В., Тытык В. М., Кевлич В. И., Микулин Г. А., Савицкий А. И. Золоторудное месторождение Новые Пески (Южная Карелия) – новый экспериментальный комплексный объект рудного сырья и строительных материалов. Петрозаводск: Труды КарНЦ РАН, № 10, 2021. Серия «Геология докембрия». С. 88–102.

10. Amelin Yu., Larin A. U-Pb and Sm-Nd zircon and garnet geochronology of scarn formation associated with rapakivi granite magmatism an example of the Pitkaranta ore district, southeastern Karelia // Anorthsites, Rapakivi Granites and Related Rocks, IGCP 290 and 315. Abstr. Montreal. Canada, 1994. P. 1.

11. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds. Saunders A. D., Norry M. J. Magmatism in Ocean Basins // Geol. Soc. London Spec. Publ. 1989. V. 42. Pp. 313–345.

ИЗМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ЗЛОТЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ В ПРОЦЕССЕ ROX – HOT CURE

Гизатуллина А. А., Анисимов И. С.

АО «Полиметалл Инжиниринг», Санкт-Петербург

Доля упорных руд в добыче золота АО «Полиметалл» составляет более 60 %. Для извлечения золота из упорных руд необходимо окислить сульфиды, содержащие тонкодисперсное золото. Такое золото не может быть извлечено иным способом. После окисления сульфидов золото, содержащееся в них, становится доступным для цианидных растворов. Автоклавное окисление (Pressure Oxidation или ROX) заключается в окислении сульфидов при повышенном давлении в атмосфере кислорода.

Амурский гидрометаллургический комбинат (АГМК) был запущен в 2012 году и перерабатывает около 225 тысяч тонн золотых концентратов в год. В конце 2024 года запланирован запуск второго комбината (АГМК-2), который подразумевает переработку такого же количества концентратов двойной упорности. Сейчас АО «Полиметалл Инжиниринг» работает над включением в схему АГМК-2 процесса Hot Cure для увеличения извлечения золота.

Окисление в действующем автоклаве происходит при температуре 200–208 °С, парциальном давлении кислорода 7 бар, общем давлении в автоклаве 21.5 бар и продолжительности около 80 минут. Отношение жидкой фазы к твердой фазе составляет 3:1. Содержание серы в питании – порядка 12%.

Автоклав имеет пять секций. Разгрузка автоклава производится из последней секции. Далее в цепочке находятся самоиспарители, в них происходит охлаждение пульпы до 99–95 °С. Охлаждение пульпы достигается сбросом давления на выходе из автоклава, из-за чего вода вскипает, испаряется, и пульпа охлаждается.

Процесс Hot Cure является важной составляющей автоклавного окисления (рис. 1). Он представляет собой кондиционирование (выдерживание) пульпы разгрузки автоклава при температуре 95–98 °С в течение 12–16 часов. Этот процесс способствует растворению основного арсената-сульфата железа (BFAS), который инкапсулирует золото, что приводит к некоторому повышению извлечения золота.

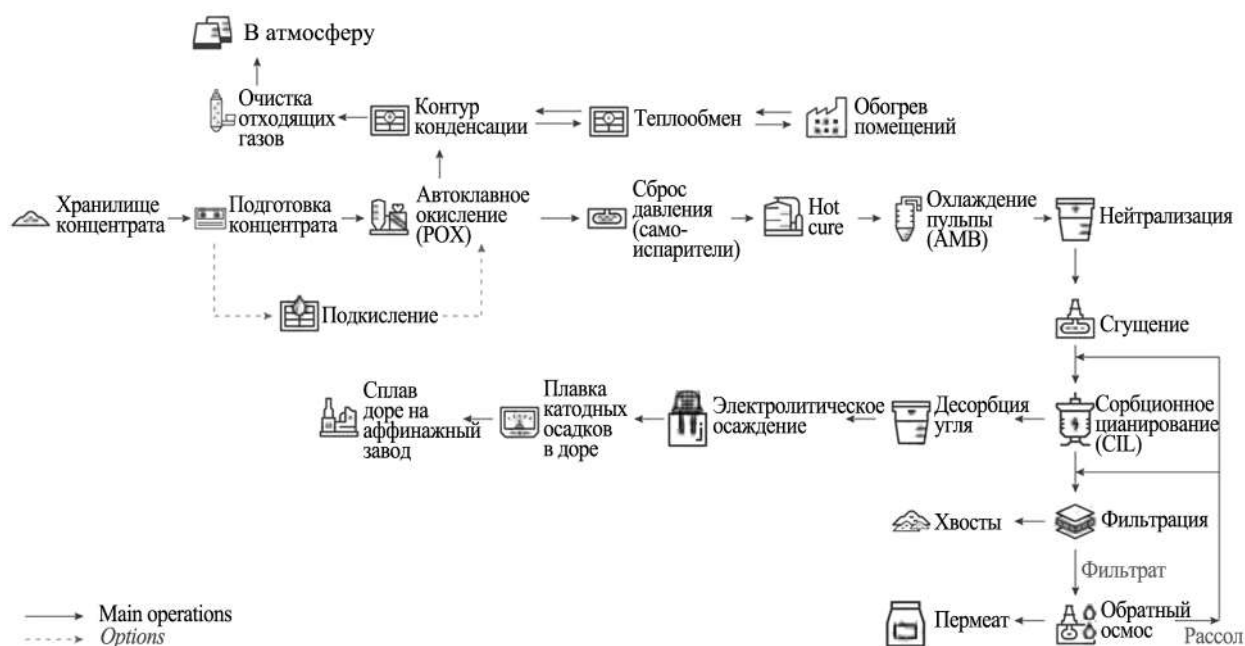


Рис. 1. Технологическая блок-схема процесса переработки золотых концентратов на АГМК-2

Целью работы являлось выявление динамики изменения минерального состава проб продуктов автоклавного окисления в процессе обработки Hot Cure при различном времени выдержки.

Методика исследования

Объектом исследования послужили пробы шихты золотых концентратов с временем проведения Hot Cure 0, 2, 4, 6, 9 и 12 часов, отобранные в технологической лаборатории ООО «Амурский гидрометаллургический комбинат» и предоставленные АО «Полиметалл Инжиниринг».

Для изучения минерального и химического состава проб использовался комплекс аналитических методов. Рентгенофазовый анализ проведен на дифрактометре Bruker D8 Advance в порошковых препаратах с использованием программы DIFFRAC.EVA и рентгенографической базы минералов COD. Количественное определение минеральных фаз выполнено в программе DIFFRAC.TOPAS по методу Ритвельда. Химический состав проб исследо-

ван методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре Rigaku NEX DE. Содержание серы и углерода в пробах определено методом ИК-спектроскопии в соответствии с отраслевыми методиками (ТПИ 1.1.553.С.2018 НСАМ № 553-С, ТПИ 1.1.554.С.2018 НСАМ № 554-С) [1]. Морфология и состав микроминеральных фаз в золотых концентратах изучены методами оптической и электронной микроскопии с использованием оптического микроскопа Zeiss AxioImager 2 и сканирующего электронного микроскопа Quanta 650 FEG с EDS/SDD детекторами Bruker XFlash® 6/30.

Результаты и обсуждение

Основной сульфат железа образует агрегаты в виде сферолитов, в срезе – звезд, снежинок. Иногда наблюдаются срастания с ярозитом, часто встречается в виде одиночных свободных выделений (рис. 2). Химический состав основного арсената-сульфата железа непостоянен, в особенности в составе и количестве микропримесей и, по всей видимости, зависит как от состава

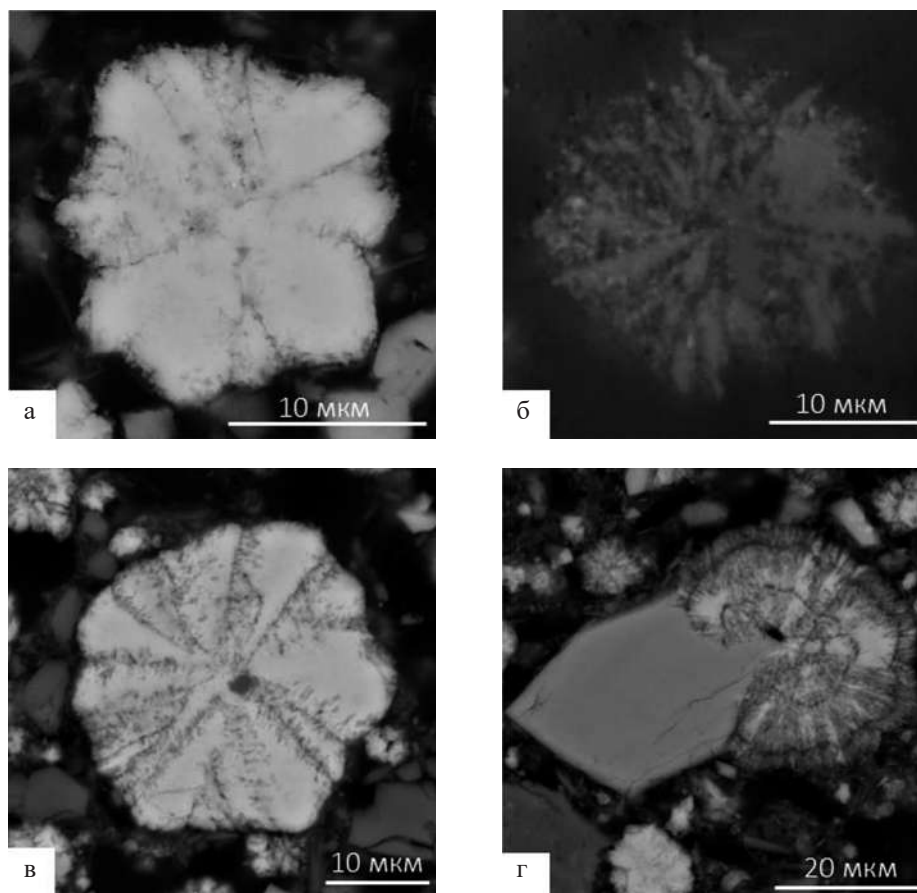


Рис. 2. Морфология агрегатов основного арсената-сульфата железа: а–в – морфология агрегатов основного арсената-сульфата железа, г – сrostок агрегата основного арсената-сульфата железа с пластинчатым ярозитом; а, в, г – BSE-изображения, б – изображение в отраженном свете

исходного питания автоклава, так и от концентрации основных компонентов в жидкой фазе. Растворение этого соединения необходимо для повышения извлечения золота, т. к. BFAS может инкапсулировать значительную часть драгметалла ввиду пористости строения агрегатов.

Основной сульфат железа образуется в кислой среде ($\text{pH} < 2$) и при высоких температурах ($> 140^\circ\text{C}$). При более кислых условиях ($\text{pH} < 1$) и при более низких температурах ($< 100^\circ\text{C}$) это соединение разрушается, также, как и в более щелочных условиях ($\text{pH} > 2$), замещаясь гематитом и гётитом (рис. 3).

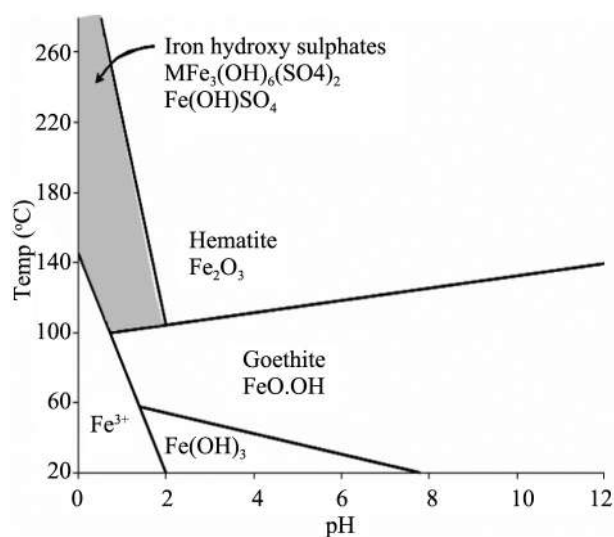


Рис. 3. Область устойчивости BFAS [2]

По данным изучения минерального состава в пробах шихты диагностируются кварц, слоистые силикаты (мусковит, каолинит), плагиоклазы, скородит и сульфаты, среди которых преобладают BFAS. Сульфидная минерализация представлена не окисленными в автоклаве пиритом и арсенопиритом в количестве от 1.0% до 1.8% (табл. 1). Установлено, что содержание общего количества серы в пробах при увеличении времени проведения процесса Hot Cure закономерно снижается (табл. 1).

При увеличении времени проведения Hot Cure наблюдается уменьшение в пробах количества основных арсено-сульфатов железа от 19.1% в исходной пробе до 9.9% в пробе 12-часовой выдержки. Содержание скородита, наоборот, возрастает от 0.4% в исходной пробе до 10.4% в пробе 12-часовой выдержки. Это может говорить о том, что при разложении основных арсено-сульфатов железа железо и мышьяк переходят в скородит, без образования гематита/гётита. Таким образом, количество BFAS за 12 часов проведения Hot Cure сократилось вдвое, а количество скородита увеличилось в 20 раз.

Результаты химического рентгенофлуоресцентного анализа представляют абсолютные содержания химических элементов (As, Fe, Ti). Они не учитывают изменение массы в ходе проведения процесса Hot Cure в связи с растворением части вещества, вследствие чего увеличивается доля нерастворимых минералов.

Таблица 1

Минеральный состав проб шихты и содержание серы, мышьяка (мас. %)

Минерал, элемент	Время проведения Hot Cure (часы)					
	0	2	4	6	9	12
Кварц	35.4	34.1	33.5	39.4	36.9	33.9
Плагиоклазы	10.5	10.6	10.7	11.2	11.2	10.8
Слоистые силикаты	17.8	18.3	18.9	20.8	19.6	18.8
Ангидрит	5.2	2.6	3.4	0.4	0.8	2.6
Ярозиты	9.5	11.6	11.8	11.2	12.1	11.8
BFAS	19.1	19.9	17.6	15.2	13.8	9.9
Скородит	0.40	0.5	1.5	1.9	6.7	10.4
Рутил	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.6
Сульфиды	1.4	1.8	1.7	1.1	1.0	1.2
Железный скрап	0.4	0.2	0.3	–	0.5	–
Сумма	100	100	100	100	100	100
S общ.	4.67	4.12	4.14	2.98	2.73	2.37
As	6.34	6.27	6.27	5.11	6.38	6.63

Исходя из постоянства количества нерастворимых минералов в пробах, методом рентгенофазового полуколичественного анализа было

проведено нормирование по титану, содержащемуся, в основном, в рутиле – нерастворимом в кислотах минерале (табл. 2).

Таблица 2

Минеральный состав проб шихты при нормировании на титан (мас. %)

Минерал	Время проведения Hot Cure (часы)					
	0	2	4	6	9	12
Кварц	35.4	27.5	25.4	30.1	24.8	23.0
Плагиоклазы	10.5	8.5	8.1	8.5	7.5	7.3
Слоистые силикаты	17.8	14.8	14.3	14.6	11.0	12.7
Ангидрит	5.2	2.1	2.5	0.3	0.5	1.7
Ярозиты	9.5	9.4	9.0	8.5	8.1	8.0
BFAS	19.1	16.1	13.3	11.6	9.3	6.7
Рутил	0.4	0.3	0.5	0.4	0.5	0.4
Скородит	0.4	0.4	1.1	1.4	4.5	7.1
Сульфиды	1.4	1.4	1.3	0.8	0.7	0.8
Железный скрап	0.4	0.2	0.2	–	0.3	–
Сумма	100.0	80.6	75.7	76.4	67.1	67.7
Потеря массы по балансу титана, %	0	19.4	24.3	23.6	32.9	32.3

Содержание основных арсено-сульфатов железа по нормированным на титан содержаниям снижается экспоненциально. Ярозиты растворяются в процессе незначительно – с 9.5% до 8.0%. Количество скородита увеличивается с 0.4% до 7.1%.

Растворение BFAS на время процесса совпадает с экспоненциальной функцией с корреляцией 0.996 (рис. 4). Дальнейшая аппроксимация этой функции до сокращения содержания основных арсено-сульфатов железа до 1% соответствует 34 часам проведения процесса в случае

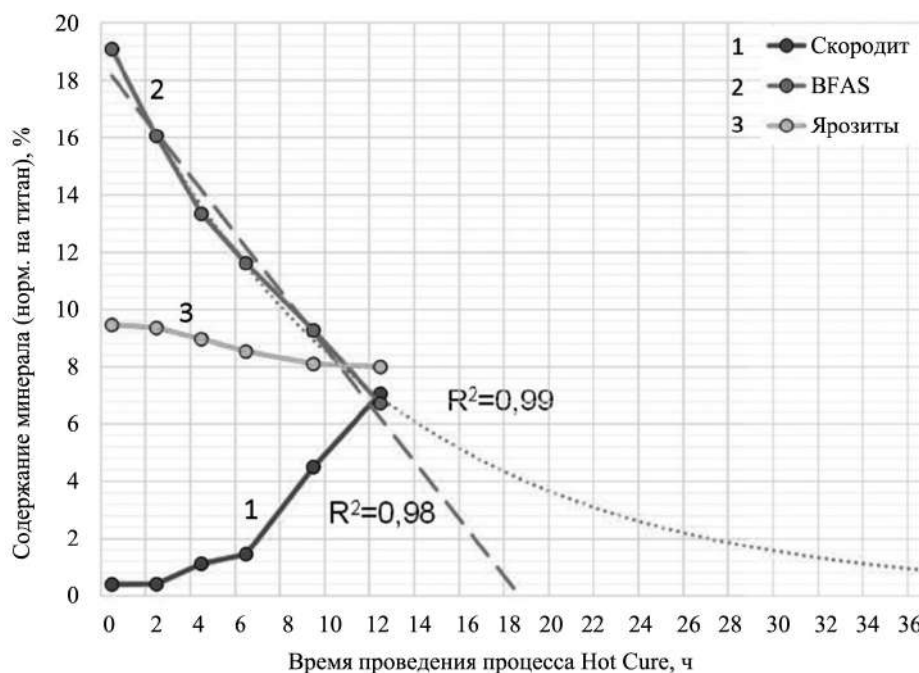


Рис. 4. Изменение содержания минералов (нормированные на титан) в пробах шихт от времени проведения Hot Cure с аппроксимацией

с экспоненциальной функцией, и 17 часам – в случае с линейной. Эта зависимость имеет теоретический характер и не отражает вскрытие золота, которое может инкапсулироваться в образующемся скородите. Возможно, при ином составе пульпы растворение основных арсено-сульфатов железа будет проходить быстрее. Необходимо проведение дополнительных опытов с большим временем выдержки для проверки этих гипотез.

Выводы

1. Наблюдается закономерное уменьшение содержаний BFAS и увеличение содержаний скородита в пробах по мере увеличения времени проведения процесса Hot Cure. Количество

BFAS уменьшилось на 48 %, количество скородита увеличилось на 96 % по сравнению с исходной пробой. Это соответствует данным химических анализов. Таким образом, в процессе Hot Cure происходит растворение основных арсено-сульфатов железа и выпадение нерастворимого скородита.

2. Уменьшение количества основных арсено-сульфатов железа за 12 часов проведения Hot Cure почти в 2 раза (до 9.9 %) может говорить о том, что времени (температуры/pH), необходимого для полного их растворения, недостаточно.

3. Необходимы дополнительные опыты с большим временем проведения процесса Hot Cure и увеличением pH среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отраслевой реестр методик анализа, допущенных (рекомендованных) к применению при лабораторно-аналитическом обеспечении ГРП на ТПИ // Федеральное агентство по недропользованию, ФГБУ «ВИМС». Москва, 2019. Лист 100–101 реестра.

2. Fleming C. A. Basic iron sulphate – a potential killer for pressure oxidation processing of refractory gold concentrates if not handled appropriately // SME Annual Meeting and Exhibit. 2010. P. 43–49.

DOI: 10.17076/tm14_42

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ГРАНАТА В ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ РОССЫПЯХ БЕЛОГО МОРЯ: СОСТАВ, ОСОБЕННОСТИ, ДИАГНОСТИКА

Соленикова Е. О.

ФГБУ ИМГРЭ, Москва

Одним из основных минералов в изученных россыпях, имеющих промышленную значимость, является гранат. Область применения минерала достаточно широка. В промышленных масштабах гранат применяется для гидроабразивной очистки поверхностей. Актуальна замена кварцевого песка гранатом при пескоструйной обработке для шлифования и полирования деталей кинескопов, при фильтрации воды [5]. Доказана эффективность применения граната при гидроабразивной резке металла, камня, композитных материалов. Характерная для граната способность при измельчении раскалываться на частицы с остросрежущими краями и поверхностная трещиноватость минерала – полезные свойства абразивного граната [1]. Это способствует регенерации и самозатачиванию затупившихся граней абразива при работе.

Для абразивных целей пригодны преимущественно железистые гранаты, в первую очередь альмандин, обладающий наибольшей твердостью, хорошей вязкостью и обычно хорошо выработанной сеткой мелкой трещиноватости [1].

Существенно понизить абразивные свойства граната может наличие вростков в минерале. Поэтому актуальной задачей является поиск промышленно значимых россыпей граната с минимальным количеством вростков.

Методика исследований

В работе использованы оптико-минералогический анализ и метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Оптико-минералогический анализ проводился по утвержденным методикам НСОММИ [2, 3] на стереоскопическом микроскопе МБС-10 и поляризационном микроскопе Leitz

Laborlux 12 Pol. Электронно-микроскопические исследования выполнены на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 (Jeol) с энергодисперсионным спектрометром Oxford Ultim Max.

Результаты исследований

В ходе работы были изучены пробы песков, отобранные на Зимнем берегу Мезенского района Архангельской области (рис. 1). По результатам исследований определены морфоструктурные особенности минералов группы граната, минеральный состав гранатов, а также состав некоторых включений в минерале.

Известно, что пески полезной толщи связаны с морскими пляжевыми отложениями [4]. Гранатовые пески образуют прослои линзовидной и пластообразной формы. Выделяются обогащенные гранатом прослои и «пустые», либо слабо обогащенные гранатом. Мощность прослоев, как обогащенных, так и пустых не превышает 30 см.

В ходе исследования было выделено 5 монофракций граната [4]. Выделение производилось по морфоструктурным особенностям граната: цвет, степень окатанности. Эта работа выполнена с целью определения возможности дифференциации минералов группы граната по внешним параметрам.

В монофракцию № 1 (рис. 2 – 1, 2, 3) были отобраны зерна граната ярко-малинового насыщенного цвета. У гранатов этой монофракции практически не наблюдалось реакционных кайм. По результатам микронзондового анализа (табл. 1) гранат в монофракции № 1 по составу отвечает альмандину. В среднем содержание альмандинового минерала в гранатах монофракции № 1 варьирует в диапазоне 60.49–78.12 мол. %. В точке 6 было получено высокое содержание спессартинового минерала – 41.92 мол. %. Вероятно, такое содержание может указывать на иные условия кристаллизации, еще один

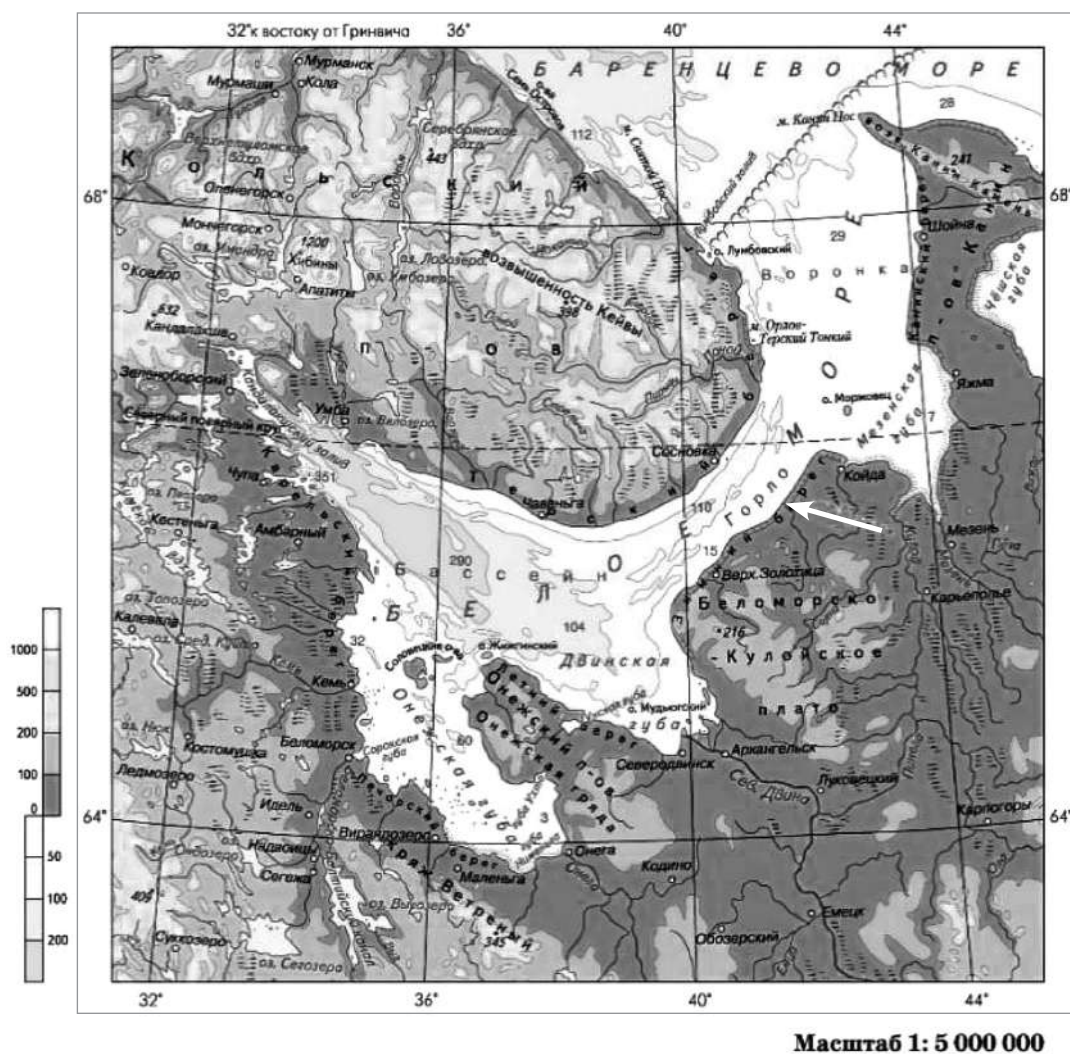


Рис. 1. Участок отбора проб на Зимнем берегу Мезенского района Архангельской области (показан стрелкой)

источник сноса. По фото (рис. 2 – 1, 2, 3) заметно, что все гранаты в монофракции № 1 имеют близкие внешние параметры: цвет, степень окатанности. При этом большая часть – альмандин

и одно зерно граната переходного альмандин-спессартинового состава. Содержание пиропового минала в зернах данной монофракции максимально достигает 24.51 мол. %.

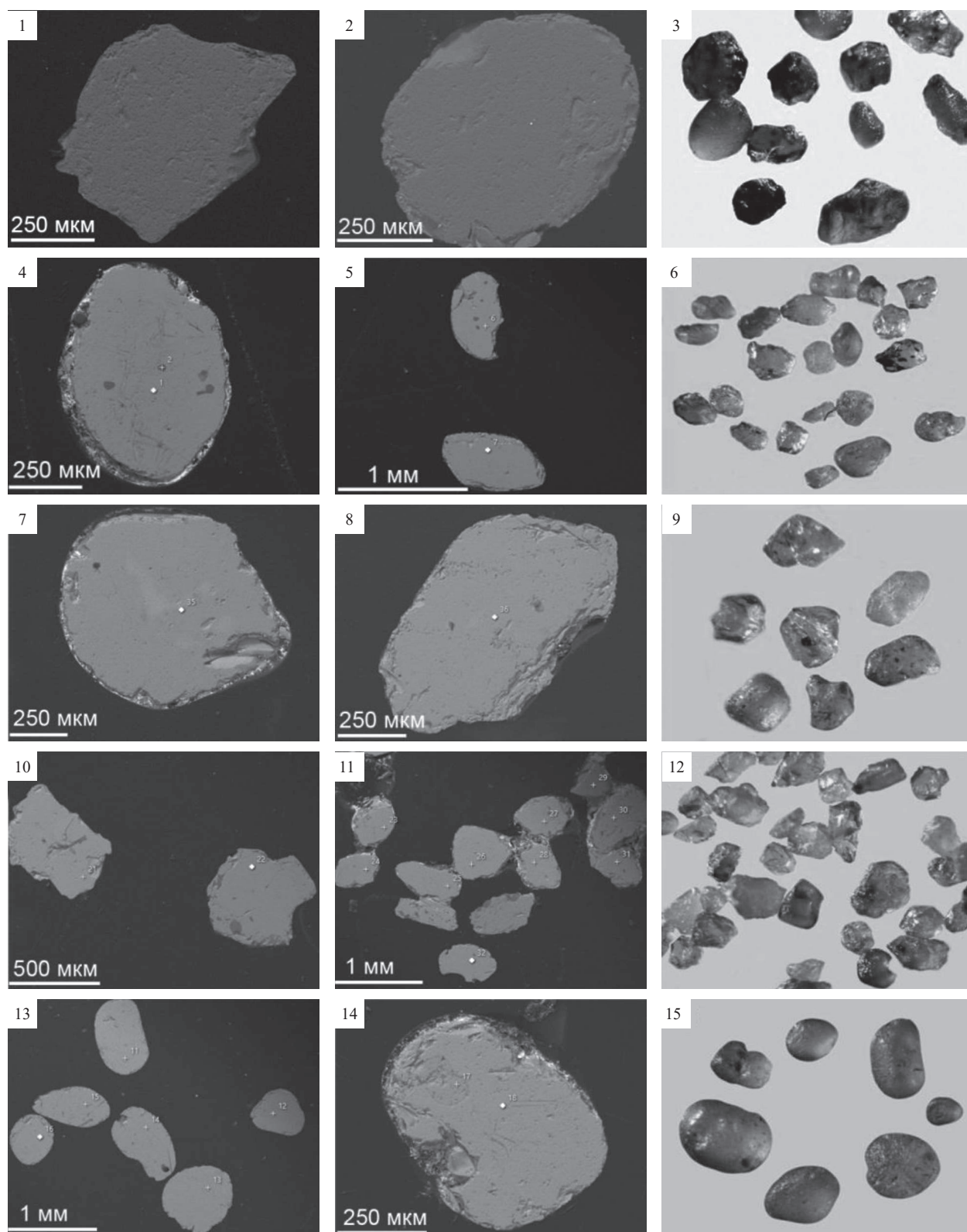


Рис. 2. Фото монофракций граната. В столбцах 1, 2 – BSE изображения, в столбце 3 – фото с бинокля

Таблица 1

**Химический состав граната в монофракции № 1
(мас. %)**

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	сумма
1	2.44	20.78	36.76	6.76	0	33.24	0.91	100.89
3	0.89	19.73	36.93	12.36	0	28.7	0.98	99.59
4	0.92	19.1	35.52	12.3		28.42	1.11	97.37
5	4.5	18.79	33.17	2.93	0	30.89	1.01	91.29
6	1.14	17.94	30.84	1.36	0.05	19.63	16.66	87.62
7	6.25	20.39	35.59	5.84	0	25.88	0.95	94.9
8	3.43	19.2	33.16	3.46	0.07	32.63	0	91.95
9	2.75	15.59	27.49	3.13	0.05	31.86	0	80.87
10	0.37	17.81	31.54	9.41	0.06	27.48	0.83	87.5

В монофракцию № 2 попали зерна граната нежно-розового цвета (рис. 2 – 4, 5, 6). Гранат здесь прозрачен, в зернах наблюдается и более холодный, и более теплый оттенок. По границе зерен наблюдаются реакционные каймы, которые могут быть индикаторами геологических процессов в породах до формирования россыпи. В гранатах встречены микровключения кварца. По результатам исследования (табл. 2) эти зерна также относятся к альмандину.

Таблица 2

**Химический состав граната в монофракции № 2
(мас. %)**

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	MnO	сумма
1	6.17	20.96	39.95	1.99	29.94	1.04	100.05
3	9.04	20.66	36.8	3.51	23.55	0.61	94.17
4	6.58	20.98	38.08	3.41	29.02	0.64	98.71
5	6.32	22.22	39.87	0.99	33.59	0.6	103.59
6	4.83	20.56	36.19	3.02	29.83	1.78	96.21
7	5.7	22.13	37.69	1.52	30.86	2.21	100.11
8	7.96	22.12	39.31	0.96	30.74	0	101.09
9	3.62	18.45	32.14	1.01	29.51	0.85	85.58
10	7.38	20.47	36.34	0.7	28.02	0.45	93.36

Содержание альмандинового минала варьирует в пределах 52.56–77.40 мол. %. Содержание пиропового минала в гранатах данной монофракции максимально достигает 35.99 мол. %. И это существенно выше содержания пироба в ярких гранатах монофракции № 1.

В монофракцию № 3 были отобраны зерна граната (рис. 2 – 7, 8, 9), похожие на зерна из монофракции № 2. В этой монофракции зерна также прозрачны и имеют холодный розовато-малиновый оттенок. По краю зерен развиваются реакционные каймы. В гранатах заметны мелкие включения. Окатанные зерна имеют кавернозную изъеденную поверхность. Исследование методом СЭМ (табл. 3) показало, что данный гранат также отвечает альмандину, с содержанием этого минала 60.05–74.29 мол. %. Максимальное значение пиропового минала достигает 30.99 мол. %. Это значение также превышает содержание пироба в густо-окрашенных гранатах монофракции № 1.

Таблица 3

**Химический состав граната в монофракции № 3
(мас. %)**

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	MnO	сумма
33	2.95	20.35	37.93	1.59	32.5	3.89	99.21
34	7.97	21.89	39.16	1.23	29.61	0.47	100.33
35	7.47	21.06	38.34	3.01	27.09	0.82	97.79
36	7.72	21.6	38.72	2.6	27.71	0.78	99.13

В монофракцию № 4 (рис. 2 – 10, 11, 12) выделены яркие красные и красно-оранжевые зерна граната, цвет граната в данной монофракции существенно отличается от прочих изученных. Степень окатанности зерен также, как и в предыдущих монофракциях, невысока. У некоторых зерен наблюдаются элементы кристаллографических очертаний, развитие реакционных кайм. По результатам исследований (табл. 4) данный гранат представляет собой альмандин с существенной долейgrossулярового минала до 32.76 мол. %. Содержание альмандиновой составляющей варьирует в диапазоне 53.70–74.61 мол. %. Интересен результат в точке 22. Содержание альмандина в ней 44.17 мол. %, а доля пироба – 37.02 мол. %. В одном из зерен данной монофракции выявлено содержание оксида гафния 0.27 мас. %.

Таблица 4

Химический состав граната в монофракции № 4
(мас. %)

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	MnO	сумма
21	2.00	20.51	36.1	5.26	32.44	1.51	97.82
22	10.46	22.11	39.51	7.00	22.27	0.49	101.84
23	3.93	19.22	34.08	8.27	22.34	1.61	89.45
24	2.13	18.5	34.27	10.15	22.34	0.91	88.30
25	4.15	19.31	35.34	3.61	29.37	1.05	92.83
26	4.9	20.63	37.17	0.83	33.05	1.42	98.00
27	0.83	17.25	31.33	8.71	22.57	2.15	82.84
28	1.23	20.38	38.39	11.73	27.21	1.49	100.43
32	0	19.52	36.52	12.53	25.58	1.87	96.02

В монофракцию № 5 (рис. 2 – 13, 14, 15) были отобраны зерна граната с высокой степенью окатанности. При этом окраска зерен была различной, зерна имели достаточно высокую степень прозрачности. Поверхность этих окатанных зерен – кавернозная. Практически все зерна в данной монофракции можно отнести к альмандину (табл. 5), за исключением анализа в точке 12. Содержание пироба там достигает 47.66 мол. %. Все остальные замеры дали диапазон альмандинового минала 54.95–71.20 мол. %.

Таблица 5

Химический состав граната в монофракции № 5
(мас. %)

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	MnO	сумма
11	1.77	16.82	32.64	5.62	21.51	6.59	84.95
12	9.81	17.17	30.68	0.8	17.85	0.34	76.65
13	6.14	22.73	40.33	4.69	29.97	1.08	104.94
14	7.65	22.03	38.67	2.6	28.5	0.91	100.36
15	5.92	19.77	38.08	3.39	26.26	0.68	94.1
16	4.84	19.77	35.55	5.02	26.03	0.55	91.76
18	3.04	21.18	37.45	4.4	32.49	2.04	100.6
19	5.26	21.53	37.2	3.49	30.51	0.89	98.88
20	6.47	21.68	38.98	7.00	26.24	0.97	101.34

Изученные зерна граната имели разнообразные минеральные включения. Как правило, это были включения кварца (рис. 3 А), магнетита (рис. 3 Б). Также были встречены включения рутила, циркона, анортита.

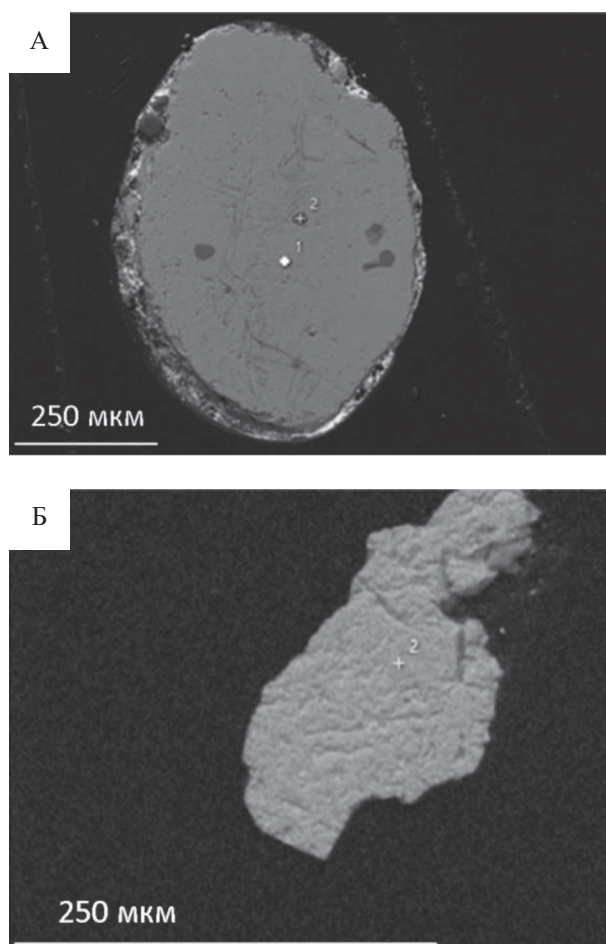


Рис. 3. Включения в минеральных зернах граната.
А – включение кварца, Б – включение магнетита

Анализ монофракций однозначно показывает преимущественный альмандиновый состав изученных гранатов (рис. 4), что подтверждает пригодность данного граната для решения задач, учитывающих абразивные свойства [1].

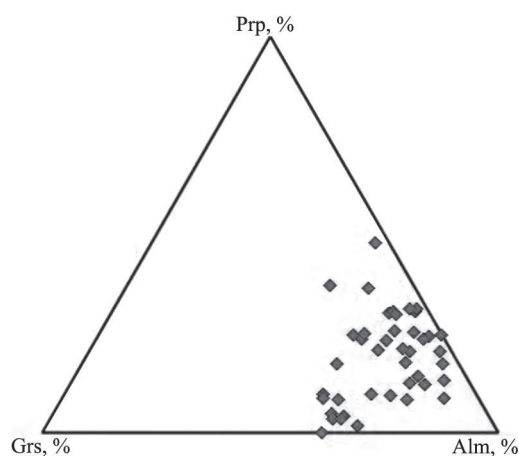


Рис. 4. Диаграмма составов граната в монофракциях в координатах миналов альмандин-гроссуляр-пироп (almandine-grossularia-pyrope)

Помимо проанализированных монофракций было выделено присутствие в пробах единичных зерен пироба и хромистого граната (рис. 5). В точках 46 и 47 зерна имеют высокий процент

пиропового минала. В точке 129 содержание пироба достигает 45.76 мол. %, а уваровита 15.62 мол. %, что пока что является единичной находкой в пробах данного района.

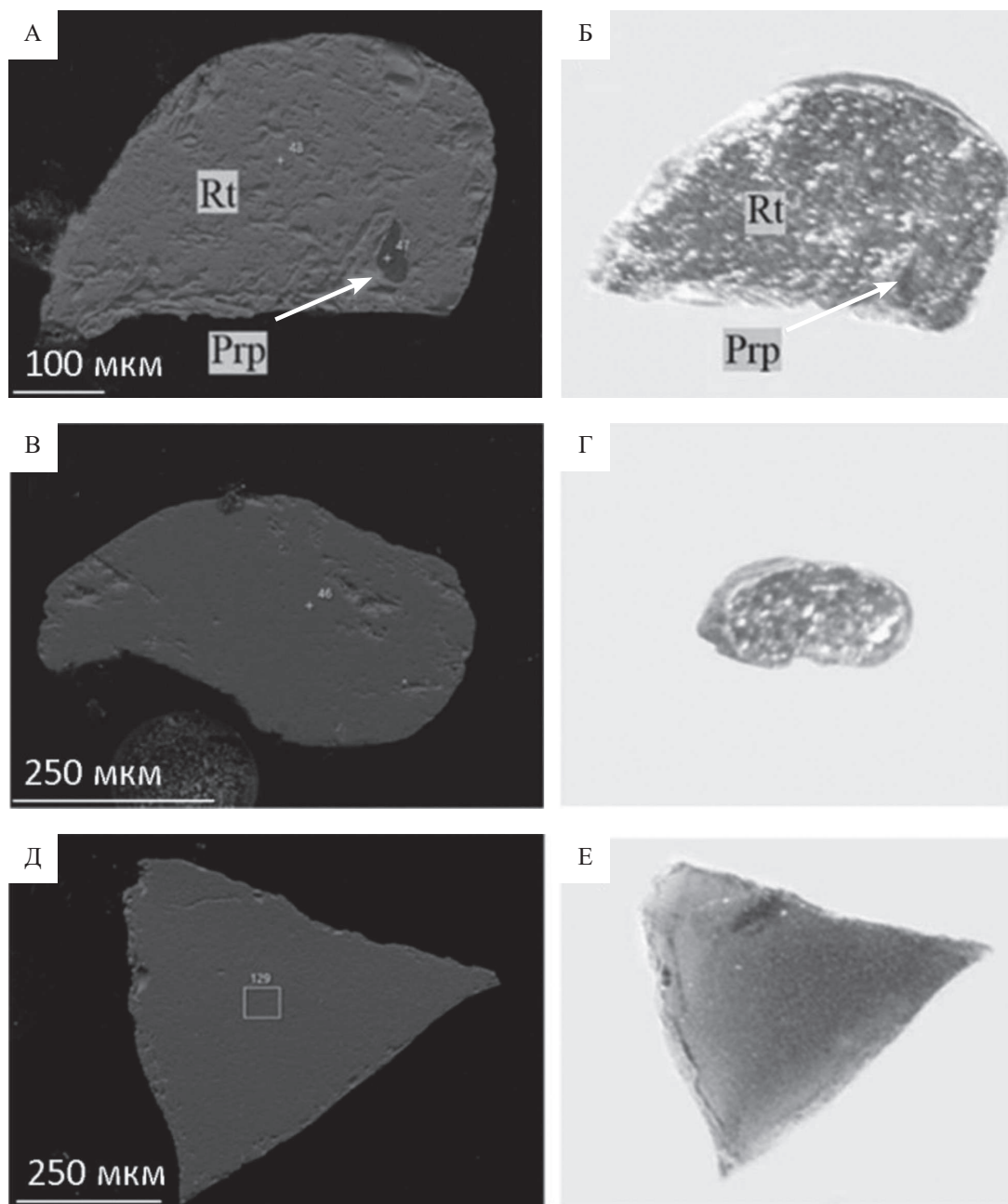


Рис. 5. Выявленные единичные зерна пироба и хромистого граната. А, Б – вероятно, участок совместного роста пироба и рутила; В, Г – пироп, Д, Е – пироп-уваровит

Таблица 6

Химический состав единичных зерен пироба и хромистого граната (мас. %)

точка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	сумма
46	14.26	14	44.86	11.3	0.19	10.1	0.66	95.37
47	20.23	12.92	32.17			16.7	1.26	83.28
129	12.29	10.46	40.37	12.47	13.72	9.99	0.7	100

Выводы

По результатам анализа проб, отобранных в россыпях Архангельской области, сделан однозначный вывод о том, что диагностировать разновидность граната в пределах группы методом только оптической микроскопии невозможно. Можно лишь оценивать морфоструктурные

особенности минерала: цвет, блеск, окатанность, наличие кристаллографических очертаний, наличие крупных включений, минеральный состав крупных включений. Все заявления о минеральном составе по внешним параметрам

требуют детальной проверки методом сканирующей электронной микроскопии и микрозондового анализа. Изученные гранаты по составу преимущественно отвечают альмандину, что отвечает требованиям к абразивному сырью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бубнова Т. П., Войтеховский Ю. Л., Гаранжа А. В. Сравнительный анализ свойств абразивных гранатов месторождения Макзапахк (Кольский п-ов) и проявления Высота (Северная Карелия) // Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов: Материалы 2-й Международной научной конференции. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2005. С. 26–27.
2. Голиусова И. В. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб // Методические рекомендации НСОММИ. М.: № 162, ВИМС, 2014.
3. Левченко Е. Н., Ожогина Е. Г. Оптико-минералогический анализ гранатсодержащего сырья // Методические рекомендации НСОММИ № 201. М.: ВИМС, 2020. 24 с.
4. Левченко Е. Н., Соленикова Е. О. Морфоструктурные особенности гранатов прибрежно-морских россыпей, определяющие технологию их переработки // Руды и металлы. 2022. № 1. С. 94–105.
5. Щипцов В. В., Скамницкая Л. С., Каменева Е. Е., Савицкий А. И Гранатовые руды Северной Карелии, технологические подходы к их освоению и возможные области использования // Геология и полезные ископаемые Карелии. 2002. № 5. С. 82–91.

ХИМИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ: МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Лихникевич Е. Г.

*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья
им. Н. М. Федоровского, Москва*

Химическая переработка редкометалльных руд и концентратов обогащения сопряжена с целым рядом особенностей, обусловленных сложностью и нестандартностью их вещественного состава. Большинство продуктов обогащения содержит в своем составе до 20 и более различных минералов разнообразных классов – силикаты, карбонаты, простые и сложные оксиды, сульфиды и др. Одни и те же полезные компоненты, как правило, связаны с разными минералами. Характерна комплексность состава и тонкая вкрапленность рудных минералов, а также рассеяние последних в различной форме по породообразующим, часто до 20–40% от общего количества металла в концентрате.

Широко используемыми в химической технологии промышленными методами переработки редкометалльных руд и продуктов их обогащения являются гидрометаллургические (выщелачивание, в том числе и автоклавное, сульфатизация) и пирометаллургические методы (хлорирование, обжиг, спекание, плавка), направленные на вскрытие руд и концентратов обогащения с целью извлечения полезного компонента, располагающие большим количеством разнообразных приемов, способных во многих случаях эффективно перерабатывать сложные по вещественному составу руды и концентраты и являющиеся завершающим этапом получения металлов и их соединений.

Для выбора способа переработки редкометалльных руд при разработке гидро- и пирометаллургических схем необходимы данные о вещественном составе исходного сырья и продуктов его передела с диагностикой всех минеральных фаз, количественной оценкой их содержания, формой нахождения извлекаемого компонента (образование им собственной минеральной фазы или соединения, изоморфные вхождения

в состав другой фазы, сорбирование на межблочных поверхностях).

Любой технологический процесс является многофакторной системой, в которой взаимосвязь всех участвующих в нем переменных подчиняется сложным закономерностям. Так, значительную роль при химической переработке редкометалльных руд играют минералы породообразующего комплекса – их состав, количественное соотношение, поэтому необходимо иметь четкое представление о характере фазовых преобразований, претерпеваемых минералами, чтобы оценить влияние этих преобразований на технологические показатели.

Максимально полная минералогическая информация о редкометалльных рудах, учитывающая индивидуальные особенности руд конкретных объектов, позволяет прогнозировать их поведение в технологических процессах и, следовательно, выбрать оптимальные технологии их переработки.

Гидрометаллургия является приоритетным направлением переработки комплексных редкометалльных руд и продуктов их обогащения, обеспечивая непосредственно, либо в сочетании с методами обогащения существенное повышение полноты и комплексности использования сырья. Агитационное выщелачивание – это метод (процесс) извлечения растворимого компонента (компонентов) из минерального сырья водными растворами различных химических реагентов при атмосферном давлении. Автоклавное выщелачивание дает возможность достижения более высоких температур и концентраций, обеспечивает благоприятный сдвиг химических равновесий и резкое увеличение скорости большинства реакций, что позволяет решить ряд технологических задач, связанных с проблемами более полного и комплексного использования сырья.

Для технологической оценки руд подобного состава с учетом современных достижений в области химии и химической технологии особое значение имеют процессы, обеспечивающие возможность формирования соединений заданного состава и различной растворимости в зависимости от вещественного состава и условий проведения процесса, к которым относятся термохимические процессы (спекание), сопровождающиеся перестройкой структуры минералов

Необходимым условием разложения минералов в том или ином растворителе в первую очередь является термодинамическая реакционная способность системы минерал-кислота (щелочь), определяемая ее удалением от равновесного состояния и количественно выражаемая отрицательным значением изменения свободной энергии Гиббса в результате ожидаемого взаимодействия. Например, по возрастанию устойчивости к действию серной кислоты тантало-ниобаты могут быть расположены в ряд: пирохлор – микроклин – колумбит – танталит, воджинит, что соответствует изменению величин энергий кристаллических решеток минералов. Однако, часто решающую роль играют кинетические ограничения, из-за которых многие термодинамические взаимодействия протекают крайне медленно. Кроме того, прослеживается определенная зависимость скорости разложения минералов от степени совершенства их кристаллической структуры: она значительно выше для метамиктных разновидностей. Для слоистых силикатов характерна большая прочность связей элементов в кристаллической структуре минералов и для химического взаимодействия в системе минерал-кислота требуются более высокие температуры и продолжительность обработки. Например, для танталитов и воджинитов, несмотря на термодинамическую возможность их разложения сульфатизацией, требуемые для сульфатообразования температуры превышают 350 °С, что свидетельствует о их невысокой реакционной способности [5].

К глубоким изменениям химических и физических свойств минералов приводит спекание их с такими вскрывающими реагентами, как NaOH, KOH, Na_2CO_3 , CaCO_3 и др. Процессы, основанные на разложении спеканием, относятся к реакциям в твердой фазе. Взаимодействие, протекающее на поверхности раздела фаз, зависит от пространственного расположения масс реагирующих компонентов, их свойств и связано с возникновением новых фаз, которые удаляются из межфазного пространства за счет диффузии.

Состав образующихся фаз и количественное их соотношение в спеке зависят от температуры, продолжительности процесса и количества, взятого для разложения вскрывающего реагента. Например, при спекании пирохлора с CaCO_3 в зависимости от соотношения компонентов образуются соединения различного состава (CaNb_2O_6 , $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_3\text{Nb}_2\text{O}_8$ и др.) и растворимости в водных и кислых средах, что используется для отделения ниобия от ряда элементов.

Взаимодействием минералов с растворами гидроксида натрия в гидротермальных условиях автоклавного выщелачивания достигается значительная интенсификация процесса, которая приводит к глубоким изменениям физических и химических свойств минералов. Так, обработка фосфатов редкоземельных элементов растворами гидроксида натрия в гидротермальных условиях сопровождается конверсией их в гидроксиды. Структурно-фазовые преобразования при взаимодействии с растворами гидроксида натрия в условиях повышенных температур и давлении претерпевает большинство силикатных и алюмосиликатных минералов.

Установленные закономерности были использованы для разработки технологий переработки руд Большетагнинского месторождения, относящегося к новому потенциально-промышленному типу, кроме ниобия, ценными попутными компонентами которого являются микроклин, уран, фосфор. По минеральному составу метасоматитов и особенностям их локализации на месторождении выделены два основных природных типа руд, которым соответствуют технологические: пирохлоровый микроклинитовый, пирохлоровый карбонатит-слюдитовый и слюдитовый [1]. При невысоком содержании ниобия (в среднем 0.935% Nb_2O_5) руды характеризуются тонкодисперсным строением, сложным минеральным составом, в том числе нестабильностью состава и свойств слагающих руды минералов, радиоактивностью. В промышленной практике отсутствуют аналоги переработки сырья подобного состава. Особенности строения и состава руды исключают возможность получения на стадии обогащения с приемлемыми технологическими показателями пирохлоровых концентратов требуемого промышленностью качества.

Для переработки флотационных пирохлоровых концентратов состава, %: 16.5–20.03 Nb_2O_5 ; 15.86–22.1 SiO_2 ; 1.5–4.5 TiO_2 ; 1.92–5.0 P_2O_5 ; 11.0–29.7 Fe_2O_3 ; 0.04–0.072 U; 0.0047–0.007 Th, некондиционных по содержанию оксида ниобия и других компонентов, полученных при обога-

щении руд Большетагнинского месторождения, на товарную продукцию (стандартный феррониобий, оксид ниобия металлургического качества (НБО-М)) разработаны следующие технологии:

– термохимическая, основанная на разложении концентратов спеканием с известняком с образованием в зависимости от расхода CaCO_3 и температуры процесса соединений различного состава и различной растворимости. Введение в состав шихты хлорида кальция способствует снижению температуры диссоциации CaCO_3 , сдвигая ее в область более низких температур (на $\sim 100\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$) и ускоряя твердофазную реакцию между компонентами шихты вследствие образования легкоплавкой эвтектики в системе $\text{CaCO}_3\text{--CaCl}_2$ [2]. Спекание при $t = 1050\text{--}1080\text{ }^\circ\text{C}$ сопровождается полным разложением концентратов. Последующее кислотное выщелачивание спека 5%-ным раствором соляной кислоты обеспечивает практически полное растворение продуктов разложения основной массы породообразующих минералов и концентрирование ниобия в нерастворимом остатке. Полученный кондиционный пирохлоровый концентрат может быть использован для производства феррониобия.

– серноокислотная, в основе которой низкая реакционная способность силикатных и алюмосиликатных минералов по отношению к серной кислоте создает условия для избирательного разложения пирохлора в составе концентратов и отделения ниобия от основной массы породообразующих. Пирохлор, несмотря на химическую устойчивость, (энергия его кристаллической решетки, отнесенная к атому кислорода или фтора, составляет 5,966 кДж/моль) достаточно интенсивно взаимодействует при повышенных температурах с концентрированной серной кислотой с образованием растворимых оксидисульфатов ниобия и тантала $\text{Nb}(\text{Ta})_2\text{O}_3(\text{SO}_4)_2$ [3]. Данная технология при проведении низкотемпературной сульфати-

зации ($180\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$) обеспечивает избирательное вскрытие пирохлора в составе сырья, а последующее гидролитическое разложение раствора сульфатов ниобия позволяет получить товарный пентаоксид ниобия марки НБО-М для последующей выплавки стандартного феррониобия.

– автоклавно-щелочно-кислотная, обеспечивающая селекцию ниобия от основной массы сопутствующих и породообразующих минеральных компонентов путем сочетания операции щелочного автоклавного и кислотного выщелачивания. Установлено, что при автоклавной обработке при $180\text{ }^\circ\text{C}$ с использованием раствора гидроксида натрия концентрации 200–220 г/л скорость разложения пирохлора резко замедляется, если в составе рудного сырья присутствует значительное количество алюмосиликатов или силикатов [4]. Последние интенсивно взаимодействуют с растворами гидроксида натрия с образованием новой фазы – щелочного гидроалюмосиликата. Кислотное выщелачивание автоклавированного продукта обеспечивает избирательное переведение основной массы алюмосиликатных породообразующих в кислый раствор. Ниобий полностью концентрируется в нерастворимом остатке. Полученный кондиционный пирохлоровый концентрат может быть использован для производства феррониобия.

Таким образом, опережающее углубленное изучение вещественного состава, идентификация новообразованных фаз в продуктах передела, установление степени концентрирования ценных компонентов в нерастворимом остатке при технологической оценке руд, позволяют получить надежную количественную основу для характеристики и комплексного использования минерального сырья, что существенно сокращает объемы технологических исследований по поиску оптимальных схем его переработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарнова Л. А. Пирохлор из метасоматитов Большетагнинского месторождения // Современная минералогия от теории к практике: матер. XI съезда рос. минералогического о-ва. Санкт-Петербург, 10–13 октября 2010 г. СПб: Горный ун-т. С. 136–138.

2. Лихникевич Е. Г., Лебедева Ю. И. Особенности термохимической переработки пирохлоровых концентратов // Разведка и охрана недр. 2014. № 1. С. 46–48.

3. Лихникевич Е. Г., Лебедева Ю. И., Ануфриева С. И. Минералогические аспекты сульфатизации пирохлоровых концентратов с повышенным содер-

жением силикатных и алюмосиликатных фаз // Разведка и охрана недр. 2014. № 11. С. 42–46.

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

5. Сидоренко Г. А., Александрова И. Т., Петрова Н. В. Технологическая минералогия редкометалльных руд. Санкт-Петербург: Наука, 1992.

ПЕРОВСКИТ И ТИТАНИТ – ВОЗМОЖНЫЕ НЕТРАДИЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ТИТАНА (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АФРИКАНДА)

Соколов С. В.

*Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья
им. Н. М. Федоровского, Москва*

Стратегический элемент титан и содержащие его разнообразные материалы играют большую, подчас решающую роль во многих отраслях промышленности Российской Федерации. Так, в процессе передела ильменитовых, лейкоксеновых, рутиловых концентратов образуются титановые белила и, что существенно важнее, губчатый титан, из которого получают металлический титан и его сплавы, обладающие повышенной механической устойчивостью, жаропрочностью и антикоррозионными свойствами. Помимо того, титан применяется в гражданском и военном авиастроении, энергетике, химической промышленности, медицине [2, 9, 13]. Недавно появились сведения о совершенно новой области использования титаната кальция (перовскит CaTiO_3), нашедшего «неожиданное применение в качестве материала для производства дешёвых и эффективных солнечных элементов» [14, стр. 9].

Крупные российские месторождения промышленных минеральных типов титановых руд с учётными запасами (коренные ильменит-титаномагнетитовые, апатит-ильменит-титаномагнетитовые, титаномагнетитовые, лейкоксен-кварцевые и россыпные с цирконом, рутилом, ильменитом) пока не достигли стадии промышленного освоения [10]. Добычу титана осуществляет только Ловозёрский ГОК, который производит лопаритовый концентрат, содержащий 38–44 мас. % TiO_2 . С целью хотя бы частичного решения проблемы титана предлагалось использовать нетрадиционные источники титанового сырья – перовскитовые и титанитовые (сфеновые) руды [8, 13].

Перовскит-титаномагнетитовые руды ($\pm$ ильменит и/или апатит) получили широкое распространение в разных регионах России: месторождения Кольского полуострова и Северной Карелии (Африканда, Вуори-Ярви, Себляярв, Лесная Варака, Салмагорское, Суриваара), Полярной Сибири (Кугда, Бор-Урях), Восточного Саяна (Задойское, Белозиминское) и Приморского края (Кокшаровское). Практически все они отно-

сятся к формации ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов. Среди них в нашей стране наиболее крупным по ресурсам титана считается месторождение Африканда [7].

На многих месторождениях Кольского полуострова выделяются пироксеновые, нефелин-пироксеновые и кальцит-амфибол-пироксеновые минеральные типы железо-титановых руд, в некоторых из которых наряду с преобладающим перовскитом установлены повышенные концентрации титанита [4]. Например, в полевошпатовых и амфиболовых пироксенитах, занимающих большие площади на массиве Африканда, средние содержания титанита составляют, соответственно, 6.3 и 11.3 об. %, а полевошпатовые пироксениты массива Лесная Варака содержат от 6.5 до 20.3 об. % этого минерала.

Запасы диоксида титана, связанные с титанитом, известны также в Хибинском и Ловозёрском массивах, где выявлены значительные скопления апатит-титанитовой руды [6]. Кроме того, титанит входит в состав добываемых на нескольких участках Хибинского месторождения нефелин-apatитовых руд, в процессе переработки которых из хвостов апатитовой флотации был выделен титанитовый концентрат [3]. К сожалению, несмотря на хорошие результаты по извлечению титанита и попутному получению востребованных на рынке титановых материалов, работы по внедрению использованных новых технологий были приостановлены в 2016 г. из-за реорганизации АО «Апатит» [8].

В ВИМСе исследованию была подвергнута рудная проба кальцит-амфибол-пироксеновой породы с месторождения Африканда. Её изучение осуществлялось комплексом методов (оптико-петрографический, минераграфический, оптико-минералогический, рентгенографический, микронзондовый рентгеноспектральный) и различными видами химического анализа – атомно-эмиссионным, масс-спектрометрией с индуктивно связанной плазмой, традиционной «мокрой»

химией и др. Это позволило детально охарактеризовать вещественный состав руды в целом (табл. 1 и 2), химический состав двух генераций перовскита (I – ранняя, II – поздняя), минералов его группы (дизаналита, лопарита) и титанита (табл. 3), а также минералого-технологические свойства перовскита [5, 11, 12].

Таблица 1

Химический состав рудной пробы

Компоненты	Содержание (мас. %)	Компоненты	Содержание (мас. %)
SiO ₂	9.90	Nb ₂ O ₅	0.97
TiO ₂	37.5	Ta ₂ O ₅	0.040
Cr ₂ O ₃	0.017	ZrO ₂	0.062
Al ₂ O ₃	1.70	La ₂ O ₃	0.838
V ₂ O ₃	0.043	Ce ₂ O ₃	2.014
FeO _{общ}	10.91	Pr ₂ O ₃	0.194
MgO	2.90	Nd ₂ O ₃	0.688
MnO	0.17	Y ₂ O ₃	0.025
CaO	27.5	Th	0.062
Na ₂ O	0.94	U	0.011
K ₂ O	0.09	S _{общ}	<0.10
SrO	0.20	H ₂ O ⁺	0.32
P ₂ O ₅	0.037	п.п.п	2.34*
Сумма		99.57	

* Из этого значения 1.94% приходится на CO₂

Таблица 2

Минеральный состав рудной пробы

Минерал	Содержание (мас. %)
Перовскит CaTiO ₃	65
Титаномагнетит Fe(Fe, Ti) ₂ O ₄	7
Титанит CaTiSiO ₄ O	5
Ильменит FeTiO ₃	1.5
Fe-Паргасит NaCa ₂ (Fe, Mg) ₅ [Al ₂ Si ₆ O ₂₂](OH) ₂	9.5
Кальцит CaCO ₃	4
Диопсид Ca(Mg, Fe)[Si ₂ O ₆]	3
Биотит-Флогопит K(Fe, Mg) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	2
Пектолит NaCa ₂ [Si ₃ O ₈ (OH)]	2
Mg-клинохлор Mg ₅ [Al ₂ Si ₃ O ₁₀](OH) ₈	1
Сумма	100.0

Таблица 3

Химический состав минералов группы перовскита и титанита (мас. %)

Компоненты	Перовскит-I (40) *	Перовскит-II (66)	Дизаналит (9)	Лопарит (22)	Титанит (20)
SiO ₂					<u>29.51÷31.86</u> ** 30.38
TiO ₂	<u>56.61÷58.86</u> 57.89	<u>52.49÷58.04</u> 55.41	<u>48.67÷51.44</u> 50.36	<u>41.14÷47.92</u> 45.88	<u>36.38÷39.95</u> 37.98
Al ₂ O ₃					<u>0.00÷2.97</u> 0.69
Fe ₂ O ₃	<u>0.36÷1.53</u> 1.05	<u>0.30÷2.02</u> 1.11	<u>0.60÷1.34</u> 0.89	<u>0.00÷1.90</u> 0.44	<u>0.90÷2.30</u> 1.88
CaO	<u>38.07÷39.95</u> 38.84	<u>32.16÷38.79</u> 36.49	<u>21.10÷25.94</u> 23.40	<u>3.46÷12.14</u> 7.98	<u>27.40÷29.84</u> 28.02
SrO	0.00	<u>0.00÷0.55</u> 0.11	0.00	<u>0.00÷0.95</u> 0.30	
Na ₂ O	0.00	<u>0.00÷1.21</u> 0.58	<u>2.48÷4.20</u> 3.21	<u>5.49÷7.17</u> 6.74	<u>0.00÷0.63</u> 0.13
Nb ₂ O ₅	<u>0.00÷1.02</u> 0.17	<u>0.00÷2.29</u> 1.16	<u>2.23÷5.52</u> 3.12	<u>3.13÷8.51</u> 2.88	<u>0.00÷1.19</u> 0.44
ThO ₂	0.00	<u>0.05÷0.50</u> 0.14	<u>0.96÷2.97</u> 1.73	<u>0.00÷2.82</u> 0.70	
La ₂ O ₃	<u>0.00÷1.09</u> 0.18	<u>0.00÷2.86</u> 1.32	<u>2.92÷4.00</u> 3.47	<u>6.43÷10.79</u> 9.15	<u>0.00÷0.89</u> 0.12
Ce ₂ O ₃	<u>0.69÷2.33</u> 1.45	<u>0.28÷4.61</u> 2.42	<u>7.84÷11.77</u> 9.58	<u>16.19÷23.63</u> 19.30	<u>0.00÷1.60</u> 0.28
Pr ₂ O ₃	0.00	<u>0.00÷0.98</u> 0.23	<u>0.00÷1.63</u> 0.46	<u>0.73÷2.31</u> 1.50	<u>0.00÷0.05</u> 0.01
Nd ₂ O ₃	<u>0.00÷0.86</u> 0.13	<u>0.00÷1.60</u> 0.60	<u>2.51÷3.64</u> 3.14	<u>3.05÷8.39</u> 4.89	<u>0.00÷0.29</u> 0.05
Сумма	99.71	99.57	99.36	99.76	99.98

* В скобках показано количество анализов. ** Над чертой – предельные содержания, под чертой – среднее значение

Перовскитовый концентрат был получен из немагнитной фракции рудной пробы в ходе её переработки по стандартным схемам обогащения (С. И. Иванков, ВИМС). Посредством флотации концентрата были выделены два продукта: № 1, содержащий 81 мас. % перовскита и 5.5 мас. % титанита, и № 2, в котором после отделения кальцита содержание перовскита несколько возросло до 83 мас. % при сохранении 5 мас. % титанита.

Основное количество TiO_2 в этих концентратах задаётся главным образом минералами группы перовскита (собственно перовскит, дизаналит, лопарит), а титанит, согласно нашим расчётам, добавляет около двух мас. % диоксида титана. В продуктах № 1 и № 2 были установлены близкие значения отношения перовскита к титаниту (14.73 и 16.60, соответственно), говорящие об отсутствии контрастных технологических свойств у этих минералов, что является положительным моментом, позволяющим совместно использовать обе титановые фазы в едином процессе.

В концентрате с максимальным содержанием перовскита (продукт № 2) было определено (в мас. %) 51.10 TiO_2 , $1.92 \text{ Fe}_{\text{общ.}}$, $1.40 \text{ Nb}_2\text{O}_5$, $0.064 \text{ Ta}_2\text{O}_5$, $5.98 \text{ REE}_2\text{O}_3$ цериевой группы ($\text{La}+\text{Ce}+\text{Pr}+\text{Nd}$), 0.086 Th и 0.014 U . Ниобий, тантал и редкоземельные элементы также присутствуют (но в меньших количествах) в составе титанита, который сопутствует перовскиту в обоих продуктах.

Для передела титанит-перовскитового концентрата использовалась технологическая схема, основная операция которой состояла в автоклавном азотнокислотном вскрытии перовскита, дизаналита, лопарита и титанита (Е. Г. Лихникевич, ВИМС). При варьирующих параметрах эксперимента ($T = 140\text{--}160^\circ\text{C}$, длительность выщелачивания от одного до четырёх часов, концентрация азотной кислоты 40–57 %) в четырёх проведённых опытах растворялось от 53 до 97 % перовскитовых фаз и весь титанит. Применённая технология обеспечивала селективное разделение сосуществующих компонентов на: 1) диоксиды титана (превалирующий рутил, а также анатаз и брукит), которые обособливаются отдельно; 2) ниобий, тантал и железо накапливаются в нерастворимом остатке; 3) карбонаты редкоземельных элементов и радионуклиды (торий, уран) практически полностью (97.6 %) переходят

в азотнокислый раствор. Извлечение титана из концентрата в конечную продукцию при выходе 61–62 % составило более 98 %, а выход кальциевой селитры 92.4 %. Необходимо сказать, что для всех продуктов передела в промышленных условиях применима эффективная дезактивация концентратов и остаточных растворов, осуществляемая 100 %-ным трибутилфосфатом [5].

Полученные в лабораторных экспериментах результаты по совместному переделу перовскита и титанита дают основание для проведения на месторождении Африканда укрупнённых технологических испытаний по обогатимости титановых руд. Для этого представляется целесообразным использовать комплексную пробу, составленную из перовскитовых руд месторождения, в которую добавлен титанит из обогащённых им полевошпатовых (6.3 об. %) и амфиболовых (11.3 об. %) пироксенитов. Положительные результаты послужат основанием рассматривать нетрадиционные титанит-перовскитовые руды месторождения Африканда как перспективный источник диоксида титана. А повышенные содержания редких и редкоземельных элементов, обусловленные их изоморфным вхождением в структуру минералов группы перовскита и, в меньшей степени, в структуру титанита, следует рассматривать как попутные полезные компоненты, позволяющие относить эти руды к комплексному типу, что повышает рудный потенциал месторождения.

Высказанные соображения тем более правомерны, что имеются факторы, которые могут ускорить его ввод в эксплуатацию. К ним относятся [1] крупные запасы сырья, возможность открытой отработки, сравнительно простые схемы обогащения, наличие обогатительной фабрики, дробильного цеха и подъездных железнодорожных путей от магистрали Москва-Мурманск, а также недалеко расположенный посёлок. Важно подчеркнуть, что решены вопросы дезактивации концентратов и продуктов передела (напомним, что повышенная радиоактивность была главной причиной снятия в 1972 г. с баланса запасов перовскитовых руд на данном месторождении). В заключение отметим, что на Африканде планируется ревизия и переоценка запасов всех полезных ископаемых, связанных с Ti, Fe, Nb, Ta, REE [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щёлочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб: Изд-во «Роза ветров», 2011. 224 с.
2. Блинов В. А., Короленко Н. В. Минеральное сырьё. Титан. Справочник. М: ЗАО «Геоинформмарк», 1998. 49 с.
3. Быховский Л. З., Лапшин А. М., Спорыхина Л. В., Чеботарёва О. С. Реальные, потенциальные и перспективные источники титанового сырья // Титан, 2016. № 3. С. 4–9.
4. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М: Недра, 1965. 550 с.
5. Лихниченко Е. Г., Соколов С. В. Поведение перовскита в процессе гидрометаллургического передела. Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений // Сборник статей IX Российского семинара по технологической минералогии. Магнитогорск. 22–24 апреля 2014 г. Петрозаводск, 2015. С. 85–90.
6. Найфонов Т. Б. Флотация титановых минералов при обогащении комплексных титансодержащих руд. Л: Наука, 1979. 165 с.
7. Николаев А. И., Ларичкин Ф. Д., Лухтон М. М. Проблемы комплексной переоценки и освоения Африкандского месторождения перовскито-титаномагнетитовых руд // Горный журнал, 2003. № 11. С. 10–14.
8. Николаев А. И., Самбуров Г. О., Киселев Ю. Г., Герасимова Л. Г. Сфениновые руды – сырьё для реализации технологии титановых соединений. Фундаментальные и прикладные аспекты технологической минералогии. Петрозаводск, 2018. С. 83–86.
9. Парфенов О. Г., Пашков Г. Л. Проблемы современной металлургии титана. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 279 с.
10. Прогнозно-геологические модели месторождений и их прикладное значение (черные, цветные, легирующие металлы и нерудное сырьё) // Минеральное сырьё. Серия методическая. № 3. Титан. М: Изд-во ВИМС, 2007. 49 с.
11. Соколов С. В. О новом нетрадиционном типе титановых руд. Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 85-летию ИГЕМ РАН. М: ИГЕМ, 2015. С. 243–244.
12. Соколов С. В., Нечелюстов Г. Н., Быстров И. Г. Перовскит из титаномагнетит-перовскитовой руды месторождения Африканда. Щелочной магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов. Труды XXXIII Международной конференции. Москва. 27 мая 2016 г. М: ГЕОХИ РАН, 2016. С. 11–118.
13. Тигунов Л. П., Быховский Л. З., Зубков Л. Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения. Минеральное сырьё. Серия геолого-экономическая. № 17. М: Изд-во ВИМС, 2005. 104 с.
14. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Геохимия титана. Сыктывкар: Геопринт, 2018. 432 с.

DOI: 10.17076/tm14_45

ПРОГНОЗ ОБОГАТИМОСТИ РУД НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СТРУКТУР

Захарова А. А.¹, Войтеховский Ю. Л.²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

² ГИ ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты

В процессе обогащения важную роль, помимо минералогического и химического состава руд, играют их структурно-текстурные особенности, поскольку характер межзерновых границ и различия механических свойств контактирующих минералов напрямую влияют на раскрытие сростков [4]. Сегодня одна из актуальных задач технологической минералогии – разработка ме-

тодик, позволяющих прогнозировать извлечение полезного минерала уже на ранних этапах геологоразведочных работ с целью разработки рациональных схем обогащения руд [6].

Краткое описание методологии

Методология типизации структур на основе статистик вероятностей бинарных межзерновых

контактов p_{ij} подробно рассмотрена в работе [3], здесь приведем лишь краткое описание. В рамках подхода минеральный агрегат (в том числе горная порода, руда) рассматривается как автоморфизм – отображение минерального набора $m_1, m_2 \dots m_n$ на самого себя (n – число минералов), управляемого оператором p_{ij} (1).

$$\{m_i\}_1^n \xrightarrow{p_{ij}} \{m_i\}_1^n \quad (1)$$

Поскольку сумма всех бинарных межзерновых контактов p_{ij} равна единице, а бинарные межзерновые контакты можно представить в виде произведения переменных m_i, m_j , основное уравнение записывается следующим образом (2).

$$\sum_{i,j=1}^n p_{ij} m_i m_j = [m_1 m_2 \dots m_n] \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_n \end{bmatrix} = E, \quad (2)$$

где E – единичная матрица.

Номенклатура структур построена на приведении симметрической матрицы p_{ij} к диагональному виду: тип структуры S_n^m соответствует такой диагональной матрице Q_{ii} (3), в которой на n позициях стоят m положительных значений (например, структура S_2^1 обозначает, что на диагональной матрице два значения, и одно из них положительное). Если на диагонали матрицы встречается нуль, то такой тип структуры называется переходным.

$$Q_{ii} = \begin{bmatrix} q_{11} & & & \\ & q_{22} & & \\ & & \dots & \\ & & & q_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Для двух минералов наглядно положение фигуративных точек можно показать на барицентрической диаграмме в виде треугольника (три типа

контактов – p_{ii}, p_{ij}, p_{jj}). Границей структурных типов в этом случае служит равновесие Харди-Вайнберга. При увеличении числа минералов в расчетах барицентрическая диаграмма переходит в многомерное пространство, и ее визуализация затруднена.

Результаты исследований

В ходе работы изучены апатитовые руды Хибинского массива (9 образцов) и железистые кварциты Костомукшского рудного поля (21 образец). Задача работы – исследование расположения фигуративных точек руд с известной обогатимостью на барицентрической диаграмме и выявление зависимости между структурными типами руд, определенными на основе описанной методологии, и степенью извлечения полезного минерала. Для подсчета числа контактов использованы панорамные фото шлифов и программа ArcGIS.

Оба типа руд анализировались по двум и трем условным минералам. Дальнейшее увеличение числа минералов более информативно, поскольку расширяется число структурных типов, но ограничено техническими возможностями.

Изучаемые апатитовые руды состоят в основном из апатита (до 100 % площади шлифа) и эгирин-авгита с подчиненным количеством нефелина и имеют близкие гипидиоморфнозернистые структуры (рис. 1).

Для первого этапа исследования выбраны апатит и матрица, для второго – апатит, эгирин-авгит и матрица. Под матрицей здесь и далее понимается сумма межзерновых контактов остальных минералов в руде. Результаты расчетов по двум минералам показаны на рисунке 2. Руды

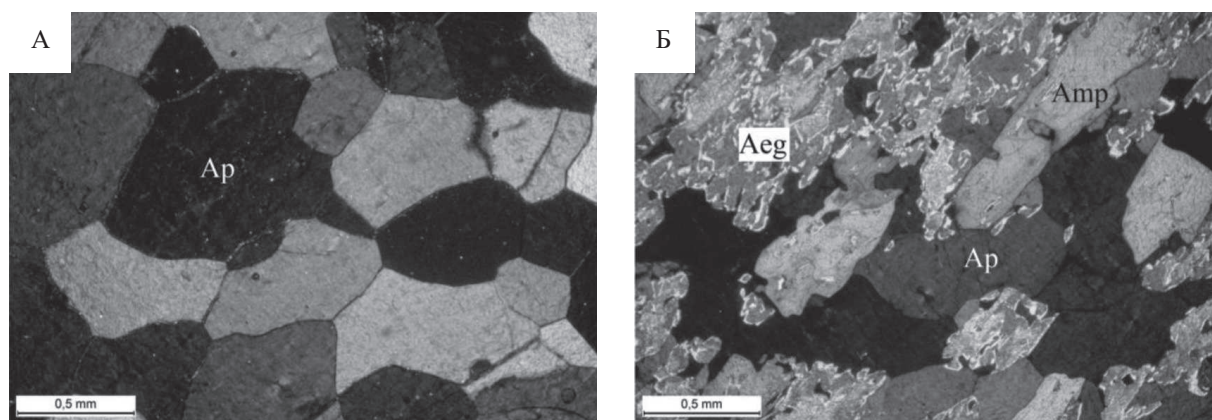


Рис. 1. А – сплошная апатитовая руда, Б – апатит-эгириновая руда
Ap – апатит, Aeg – эгирин-авгит, Amp – амфибол, николи X

разделились на три поля в зависимости от содержания апатита. Извлечение апатита ухудшается при движении от вершины р (Ар-Ар), где расположены сплошные апатитовые руды, к середине диаграммы. Руды с низким содержанием апатита характеризуются присутствием эгирина и нефелина, при этом структурный тип определяется структурными особенностями: в обр. 7 эгирин рассеян среди зерен апатита, что порождает большое число полиминеральных контактов, и фигуративная точка смещается к вершине р (Ар-М). В обр. 8–9 наблюдаются мономинеральные сростки нефелина, и точка смещается к вершине р (М-М).

Более тонкие различия между рудами выявлены при расчетах по трем минералам (табл. 1). Для сплошных руд с наилучшим извлечением апатита получены переходные структуры (обр. 1 и 4), остальные образцы разделились на два типа. Отметим, что по литературным данным флотация апатита ухудшается при наличии гипергенных изменений [1], а раскрытие сростков зависит от их минерального состава [2]. Таким образом, структура S_3^1 характерна для руд с осложненным извлечением апатита: в обр. 3 и 5 наблюдается шпреуштейнизация, в шлифе 7 – сложные сростки с эгирином, флотационные свойства которого близки к апатиту [2]. В образцах со структурой S_3^2 такие особенности не наблюдаются, что говорит о хорошем извлечении апатита.

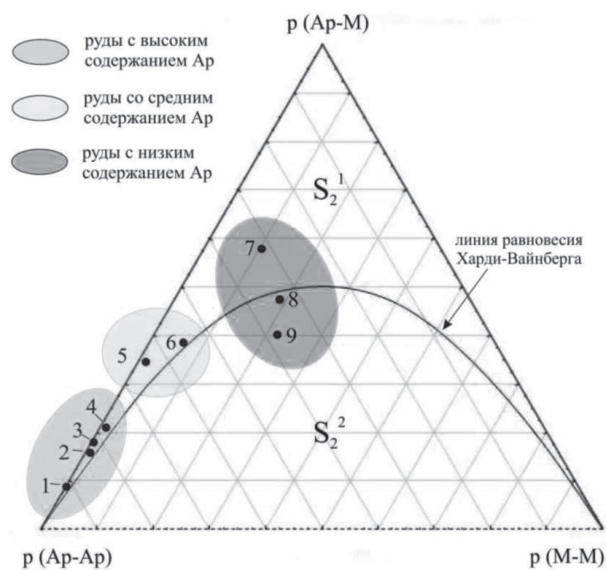


Рис. 2. Барицентрическая диаграмма вероятностей для апатитовых руд (Ар – апатит, М – матрица)

Таблица 1

Результаты типизации структур апатитовых руд по трем минералам

№ образца	Структурный тип
1	переход от S_3^1 к S_3^2
2	S_3^2
3	S_3^1
4	переход от S_3^1 к S_3^2
5	S_3^1
6	S_3^2
7	S_3^1
8	S_3^2
9	S_3^2

Перейдем к следующему объекту. Железные руды представлены упорными Костомукшскими (ТК-руды) и легкообогатимыми Корпангскими (ЛК-руды). Породообразующие минералы – кварц и магнетит. Структуры руд лепидо- и немато-гранобластовые. Для легкообогатимых руд характерны свободные зерна магнетита среднего размера, для упорных руд – мелкозернистый магнетит в сростках (рис. 3).

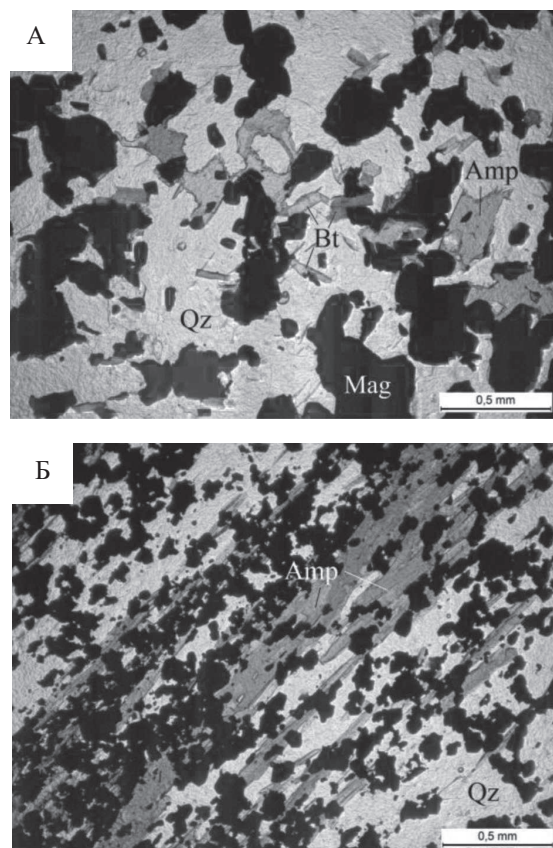


Рис. 3. А – пример ЛК-руды, Б – пример ТК-руды
Amp – амфибол, Bt – биотит, Mag – магнетит, Qz – кварц, николи II

Результаты расчетов по двум минералам (магнетит и матрица) представлены на рис. 4. Все образцы относятся к одному структурному типу S_2^1 (контакты магнетит-магнетит не учитывались из-за изучения шлифов, и все точки расположены на ребре диаграммы), поэтому в этом случае нас больше интересует расположение фигуративных точек. ТК-руды распределены по ребру диаграммы и тяготеют к вершине p (М–М), что связано с присутствием в этих рудах мономинеральных сростков амфибола и биотита (при расчетах учитывались в составе матрицы). Силикаты, в которых присутствуют катионы железа, усложняют раскрытие сростков с магнетитом при флотации и ухудшают его извлечение [5]. Большая часть ЛК-руд компактно расположена на середине диаграммы, что указывает на увеличение числа контактов магнетит-матрица (становится больше свободных зерен магнетита). Как и в случае

апатитовых руд, типизация структур по двум минералам отражает общие характеристики извлечения полезного минерала.

В результате типизации структур по трем минералам (магнетит, кварц и матрица) получены два структурных типа (табл. 2), которые отражают особенности раскрытия минеральных сростков. Структура S_3^1 характерна для руд с мелкозернистым магнетитом в сростках (в том числе пойкилитовых) с амфиболом и биотитом. Как упоминалось ранее, присутствие значительной доли силикатов усложняет флотацию, а мелкозернистый магнетит требует дополнительного измельчения [1], что усложняет получение качественного концентрата. Структура S_3^2 характерна для руд со свободными зернами магнетита в сростках преимущественно с кварцем, которые раскрываются значительно лучше.

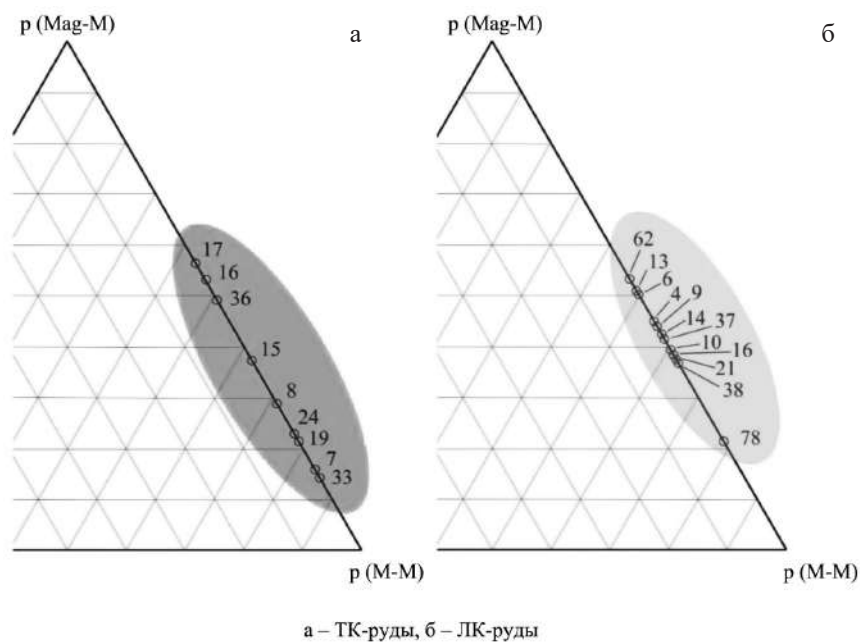


Рис. 4. Фрагменты барицентрических диаграмм вероятностей для железных руд (Mag – магнетит, М – матрица). Контакты Mag-Mag не учтены

Таблица 2

Результаты типизации структур железных руд по трем минералам (фрагмент)

ЛК-руды		ТК-руды	
№ образца	Структурный тип	№ образца	Структурный тип
4	S_3^2	7	S_3^1
6	S_3^1	8	S_3^1
9	S_3^2	15	S_3^2

Закключение

В работе показано применение методики типизации структур, основанной на статистике вероятностей бинарных межзерновых контактов, для выявления различий между рудами близкого состава. На примере апатитовых (Хибины) и железных (Костомукша) руд с известной обогатимостью установлена зависимость между структурными типами, определенными согласно

методике, и степенью извлечения полезного минерала. Расчеты по двум минералам отражают относительную степень извлечения, а расчеты по трем характеризуют раскрытие минеральных сростков при обогащении. На основе предложен-

ного статистического подхода можно разделять руды на технологические типы уже на ранних этапах геологоразведочных работ, и использовать методику для решения задач минералогического картирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. М.: Изд-во МГГУ, 2004. Т. II. 510 с.
2. Брыляков Ю. Е. Развитие теории и практики комплексного обогащения апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений. М.: МГРИ, 2004. 44 с.
3. Войтеховский Ю. Л. Алгебраическое описание петрографических структур и их преобразований // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2016. № 10. С. 59–68.

4. Изоитко В. М. Технологическая минералогия и оценка руд. СПб.: Наука, 1997. 582 с.
5. Северов В. В. Разработка процесса обратной флотации железистых кварцитов с использованием катионных и неионогенных собирателей. М.: МИСиС, 2011. 27 с.
6. Щипцов В. В., Котова О. Б., Ожогина Е. Г., Пирогов Б. И. Технологическая минералогия во всем пространстве // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 10. С. 44–66.

DOI: 10.17076/TM14_46

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СОСТАВА ЗОЛЫ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРОВ, УЛОВЕННОЙ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕЙ НА ОМСКОЙ ТЭЦ-4

Лавриненко А. А., Кунилова И. В., Сыса П. А., Шимкунас Я. М.

ИПКОН РАН, Москва

В последние годы проблема утилизации минеральных техногенных отходов становится все более острой в связи с увеличением объемов добычи и использования минерального сырья [2]. Одно из первых мест по объему образования среди промышленных отходов принадлежит золам и шлакам от сжигания твердого топлива.

Правительством Российской Федерации в рамках утвержденной Энергетической стратегии поставлена задача по достижению к 2035 году 50%-го уровня утилизации от годового объема образования золошлаковых отходов [4]. Актуальность настоящих исследований состава и структуры золы электрофильтров, уловленной при сжигании углей, обусловлена необходимостью последующего прогноза физико-химических и технологических свойств золы с целью определения перспективных направлений ее использования из-за низкого спроса на использование золы электрофильтров в строительных отраслях.

Объектом исследований являлась зола электрофильтров омской ТЭЦ-4 (АО «ТГК-11»),

сжигающей каменные угли Экибастузского угольного бассейна (Казахстан). Высокая зольность экибастузских углей (в среднем 45%) обуславливает повышенное количество отходов, образующихся после их сжигания. Годовой объем образования золы составляет более 20 тыс. т. На ТЭЦ-4 работает установка по отбору сухой золы проектной производительностью 210 тыс. т золы в год, что способствует уменьшению складирования золошлаковых отходов на золоотвале.

Методы исследований

Анализ элементного состава образцов золы проведен на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре Advant'X IntelliPower ARL (Центр изучения природного вещества ИПКОН РАН), анализ содержаний микроэлементов – на рентгенофлуоресцентных спектрометрах Olympus X-5000 (лаборатория ЭКОН ИПКОН РАН) и микрорентгенофлуоресцентном спектрометре M1 MISTRAL (ООО «Мелитэк»). Анализ гранулометрического состава золы

проведен методом сухого рассева на виброгрохоте Haver EML Digital Plus (лаборатория ЭКОН ИПКОН РАН). Структурно-минеральные особенности золы исследованы при помощи оптического микроскопа Olympus BX-51 с видеокамерой (лаборатория ЭКОН ИПКОН РАН), анализ минеральных фаз – на рентгеновском дифрактометре D2 PHASER Bruker (ООО «Мелитэк»).

Результаты и их обсуждение

Анализ элементного состава образцов золы, проведенный рентгенофлуоресцентным методом, показал, что исследуемая зола отличается значительным содержанием оксидов кремния (57.4% SiO_2) и относительно низким содержанием недожжённого углерода (5%). Также относительно невысоким является содержание железа – 3.3%. При более высоких содержаниях углерода и железа целесообразна комплексная переработка золы с отделением углеродсодержащей и магнитной железосодержащей фракций. Углеродсодержащая фракция может применяться в качестве добавки к топливу. Железосодержащую фракцию возможно использовать как корректирующую добавку в производстве цемента [4].

Содержание оксида кальция составляет всего 0.77% (<10%), что позволяет отнести данную низкокальциевую золу к сверхкислым золам – тип К [1]. Кислые золы рекомендуются использовать в качестве сырья в цементной (строительной) промышленности – в качестве гидравлической добавки к цементам, заполнителя в тяжелых и ячеистых бетонах, в производстве вяжущих автоклавного твердения [3]. Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO_3 составляет 0.14% и является очень низким (не должно превышать 3%).

Анализ гранулометрического состава показал, что исследуемая зола электрофильтров является тонкодисперсным материалом. Основная фракция исследуемой золы имеет крупность менее 0.02 мм (выход 57%). Также значительно содержание фракции от 0.04 до 0.02 мм (выход 26.6%).

Для установления принципиальной возможности попутного комплексного извлечения ценных микроэлементов из золы проведен анализ распределения содержаний элементов по классам крупности. Самый крупный класс +0.071 мм содержит повышенное количество кремния, алюминия, железа, кальция и титана

по сравнению с остальными (таблица 1). Также класс +0.071 мм несколько обогащен марганцем, цирконием, церием и иттрием. Самый тонкий класс –0.02 мм обогащен кобальтом, ванадием и также цирконием (таблица 2).

Таблица 1

Содержания основных элементов в образце по классам крупности, %

Класс, мм	Si	Al	Fe	Ca	Ti
+0.071	27.6	13.9	5.7	0.94	0.90
–0.071 + 0.04	21.7	12.2	4.6	0.63	0.60
–0.04 + 0.02	22.5	11.7	4.2	0.62	0.60
–0.02	24.9	10.9	5.2	0.58	0.60

Таблица 2

Содержания микроэлементов в образце по классам крупности, г/т

Класс, мм	Mn	Zr	Co	V	Y	Ce
+0.071	900	475	н/о	123	62	159
–0.071 + 0.04	800	372	295	125	49	н/о
–0.04 + 0.02	600	368	236	119	45	н/о
–0.02	800	430	383	144	48	н/о

Наличие редких микроэлементов в образце золы – иттрия (60 г/т), а также галлия (20 г/т) – подтверждено дополнительно методом микрорентгеновской флуоресценции.

В процессе сжигания угля образуются новые минеральные фазы, в т.ч. нестехиометрического состава. Рентгенофазовый анализ показал наличие рентгеноаморфной алюмосиликатной фазы и кристаллических фаз – в основном высокотемпературной модификации кварца, муллита и иных алюмосиликатов переменного состава, а также сульфатов и оксидов кальция, магнетита и гематита, примесей сплавов металлов с железом (марганца, титана). Установлено наличие циркония, входящего в состав циркона (ортосиликат циркония ZrSiO_4).

Данные микроскопического анализа показали, что зола содержит алюмосиликатные микросферы различных размеров (чаще всего 5–20 мкм), углеродные, минеральные и металлические частицы неправильной формы, а также спекшиеся углеродные и алюмосиликатные частицы неправильной формы (рис. 1).

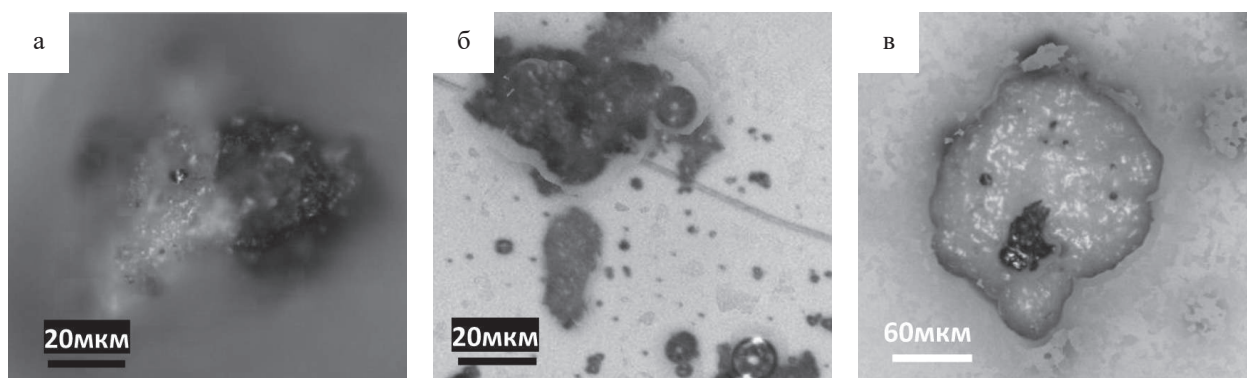


Рис. 1. Изображения частиц золы: а – спекшийся агрегат углеродной и алюмосиликатной частиц, б – микро-сферы и алюмосиликатные частицы, в – вкрапления металлсодержащих частиц в алюмосиликатную

Выводы

Анализ состава золы электрофильтров от сжигания каменных углей показал, что исследуемая зола является полидисперсным материалом сложного вещественного состава и структуры. По химическому составу зола относится к кислому типу и может быть ис-

пользована в качестве сырья в цементной промышленности. Наличие спекшихся агрегатов, тонкой вкрапленности частиц, а также неравномерность распределения микроэлементов (Mn, Zr, V, Co, Ce, Y) необходимо учитывать при разработке комплексных технологий их попутного извлечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25818–2017. Золо-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2017. 23 с.
2. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра), 2021. 572 с. [Электронный ресурс]: <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf> (дата обращения 20.06.2022).
3. Русина В. В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие. Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. 224 с.
4. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения 20.06.2022).

К ЮБИЛЕЮ

БОРИСА ИВАНОВИЧА ПИРОГОВА



21 июля 2022 г. исполнилось 90 лет Борису Ивановичу Пирогову, профессору, доктору геол.-мин. наук, заслуженному работнику УССР, почетному разведчику недр РФ, почетному члену Минералогического общества России, лауреату премий Совмина СССР и Высшей школы Украины, главному научному сотруднику ФГБУ «ВИМС» им. Н. М. Федоровского. В 2022 году Б. И. Пирогов отмечает также 65 лет производственной, научной, педагогической и общественной деятельности. Он окончил в 1956 г. Криворожский горнорудный институт, работал на кафедре кристаллографии, минералогии и петрографии, с 1958 г. в ГОКе «Южный».

В 1965 г. Б. И. Пирогов успешно защитил кандидатскую диссертацию и стал руководителем отдела вещественного состава руд и концентратов в Механобрчермете. В 1970 г. возвратился в Криворожский горнорудный институт, возглавив кафедру минералогии, кристаллографии и месторождений полезных ископаемых, которой руководил 27 лет. В 1978 г. защитил докторскую диссертацию, в 1979 г. ему было присвоено звание профессора. В 1997 г. по воле судьбы переехал в Москву, где работал профессором кафедры минералогии и геохимии РГГРУ, а затем стал главным научным сотрудником ВИМСа.



Б. И. Пирогов (справа) со своим учителем профессором А. С. Поваренных в Криворожском геологоразведочном институте (1957) (фото предоставил М. Ю. Поваренных)

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

Таким образом, с первого дня деятельности комиссии по технологической минералогии до настоящего времени Б. И. Пирогов является активным членом бюро комиссии. Он внес большой вклад в создание теоретической базы этого направления, в частности, им разработаны принципы геолого-технологической оценки руд с учетом закономерностей изменчивости технологических свойств минералов в единой геолого-технологической системе. Им была составлена первая геолого-технологическая карта Склеватского место-

рождения 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.)». Особый интерес представляет монография коллектива авторов «Технологическая минералогия железных руд», в которой рассмотрены проблемы технологической минералогии руд на современном ГОКе. К этому же периоду относится появление учебного пособия по принципам и методам геолого-технологического картирования месторождений полезных ископаемых.



На Шокшинском карьере малинового кварцита.
Слева направо: Ю. Л. Войтеховский, Б. И. Пирогов,
Л. Т. Раков (2009)



Н. П. Юшкин и Б. И. Пирогов в пригороде
г. Сыктывкара (2010)



Годичное собрание РМО, г. Санкт-Петербург,
Горный университет (2009)



Б. И. Пирогов с группой молодых специалистов,
участников X Российского семинара по технологи-
ческой минералогии на экскурсии на Лебединском
ГОКе, г. Губкин (2015)



Б. И. Пирогов выступает на юбилейном съезде РМО.
г. Санкт-Петербург, Горный университет (2017)



Фуршет по случаю 100-летия «Механобр», г. Санкт-Петербург. Слева направо: В. В. Щипцов, Р. И. Ко-
неев, И. Н. Бурцев, Б. И. Пирогов, В. И. Кевлич,
Л. А. Вайсберг (2017)



Б. И. Пирогов (в центре) среди участников IV Российского семинара
по технологической минералогии в г. Нижний Новгород (2009)

Дорогой Борис Иванович, Вы активно участ-
вуете в наших семинарах, Ваши выступления
и статьи в ежегодных сборниках – это бесцен-

ный материал по научным и методическим ос-
новам технологической минералогии, например,
«Методология технологической минералогии

и природа технологических свойств минералов» (Петрозаволск, 2006); «Технологическая минералогия полезных ископаемых как основа оценки их комплексности» (Петрозаволск, 2007); «Онтогенический анализ полезных ископаемых – основа выявления и оценки технологических свойств минералов» (Петрозаволск, 2008); «Современные проблемы технологической минералогии» (Казань-Чебоксары-Нижний Новгород, 2009); «Современные проблемы технологической минералогии на горно-обогатительном комбинате (на примере железных руд)» (Сыктывкар, 2010); «Поведение минералов в единой геолого-техногенной системе» (Петрозаволск, 2011); «История становления и развития технологической минералогии» (Москва, 2012); «Срастания минералов и структурный анализ руд в технологической минералогии» (Санкт-Петербург, 2013); «Особенности неоднородности титанмагнетитов магматогенных железных руд, определяющих их обогатимость» (соавтор Быстров Н. Г.; Магнитогорск, 2014); «Современные проблемы технологической минералогии» (соавторы Ожогина Е. Г., Рогожин А. А.; Белгород, 2015); «Технологическая минералогия в развитии минерально-сырьевой базы России и роль комиссии технологической минералогии РМО» (соавторы Щипцов В. В., Ожогина Е. Г., Котова О. Б.; Санкт-Петербург, 2016); «Мартитизация в железистых кварцитах и богатых рудах железисто-кремнистых формаций докембрия» (Санкт-Петербург, 2017); «Технологическая минералогия в авангарде новых задач и реше-

ний в минерально-сырьевом секторе экономики» (соавторы Щипцов В. В., Ожогина Е. Г., Котова О. Б.; Москва, 2022).

В одном из Ваших выступлений было четко охарактеризовано, что технологическая минералогия объединяет минералогические и технологические исследования, связанные с изучением вещественного состава, текстурно-структурных признаков полезных ископаемых, технологических свойств минералов, направленные на разработку рациональных схем их обогащения, комплексное использование минерального сырья и что разработку научной системы и методологии этого важнейшего направления прикладной минералогии следует увязывать с основами теории минералогии в целом, физики и химии твердого тела, достижениями таких дисциплин, как поиски, разведка и оценка месторождений, обогащение, экономика и экология полезных ископаемых. Вы, бесспорно, относитесь к плеяде видных минералогов страны. Под Вашим научным руководством защитилось более 30 кандидатских и докторских диссертаций. Вами опубликовано более 400 научных трудов, в т. ч. более 20 монографий.

Передаем Вам наилучшие пожелания от Ваших друзей и знакомых.

Часть приводимых фото дополняют в той или иной степени многогранную деятельность в области технологической минералогии.

*Комиссия
по технологической минералогии
РМО*

ПОТЕРИ НАУКИ

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА

ДМИТРИЯ ВАСИЛЬЕВИЧА РУНДКВИСТА (1930–2022)



15 января 2022 года ушел из жизни Дмитрий Васильевич Рундквист, советский и российский учёный-геолог, минералог и металлогенист, доктор геолого-минералогических наук, профессор, президент Российского минералогического общества (1987–2015), академик АН СССР.

К 80-летию академика Д. В. Рундквиста вышла книга «Наш Дима, ДВ, Дмитрий Васильевич Рундквист» (составители Н. Звездинская и Н. Рундквист. – Екатеринбург: Квист, 2010. – 164 с.). В этой книге, написанной разными авторами, дан коллективный портрет выдающегося ученого и человека России.

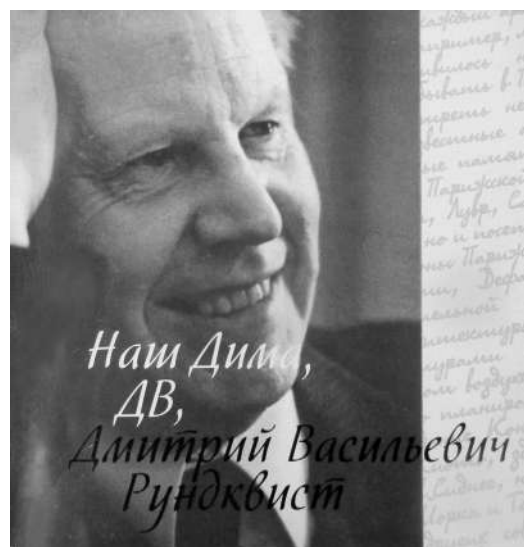
В 1948 году Д. В. Рундквист поступил на геологоразведочный факультет Ленинградского горного института, который окончил по специальности «Геологическая съемка и поиски месторождений полезных ископаемых».

Дмитрий Васильевич много ездил по стране, часто выступал с докладами на конференциях. На приложенных фотографиях запечатлены такие моменты. Геологические экспедиции оставили ярчайший след от каждого маршрута. Вот так он сам характеризовал такую деятельность в одном из интервью: «Составление одной из геологических карт Тувинской АО оставило у меня ярчайший след от постоянной радости каждого маршрута, каждого проведенного контура на карте. Особенно по душе мне оказались северные территории Карелии, Кольского полуострова, Полярного Урала – у нас в стране; Финляндии, Швеции, Канады – за рубежом».

Основные направления научных интересов Д. В. Рундквиста были геология рудных месторождений, глобальная и региональная металлогения, минералогия, петрография, геодинамика и сейсмоструктурная геология. Под его руководством и при участии были изданы капитальные монографии «Зональность эндогенных рудных месторож-

дений» (1975), «Критерии прогнозной оценки территорий на твердые полезные ископаемые» (1978), «Рудоносность и формации структур земной коры» (1981), серия книг «Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций» (1983–1986 гг.), монографии «Докембрийская геология СССР» (1988), «Месторождения полезных ископаемых докембрия СССР» (1991), «Основы металлогенического анализа при геологическом картировании докембрия» (1995). Начиная с 1984 года на основе формационного анализа были созданы карты «Металлогения СССР» (16 карт регионов) и серия карт «Прогнозная оценка территории на комплекс полезных ископаемых», охвативших всю территорию СССР. В 1986–1991 гг. был главным редактором «Атласа металлогенических карт СССР». В общем послужном списке более 400 научных работ, в том числе более 20 монографий.

Необходимо указать, что предисловие к первому выпуску трудов по технологической минералогии было написано Д. В. Рундквистом. Он отметил, что технологическая минералогия определяется как новое научное направление в геологических науках, изучающее минералы



Обложка книги «Наш Дима, ДВ, Дмитрий Васильевич Рундквист» (2010)



Первый Всероссийский Палеовулканонологический симпозиум, посвященный памяти чл.-корр. РАН И. В. Луцицкого, Петрозаводск. Первый план (слева направо): акад. РАН В. А. Коротеев (Екатеринбург), акад. РАН Ф. П. Митрофанов (Апатиты), д.г.-м.н. К. И. Хейсканен, акад. РАН Д. В. Рундквист (Москва) (2001)



Президент РМО, академик РАН Д. В. Рундквист выступает с докладом на годичном собрании РМО, Санкт-Петербург (2009)

Президент РМО, академик РАН Д. В. Рундквист на VII Российском семинаре по технологической минералогии, Москва, ВИМС. На трибуне председатель комиссии по технологической минералогии В. В. Щипцов (2012)



в качестве объектов переработки с помощью различных технологий и объединяющее все виды минералогических исследований с изучением технологических свойств минералов и руд.

Комиссия по технологической минералогии продолжает свою деятельность по развитию важного научного направления, при этом все годы Дмитрий Васильевич как президент РМО очень внимательно относился к ее деятельности и оказывал всякую поддержку.

Д. В. Рундквист награждён Орденом Почёта, Орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени, «Заслуженный геолог РСФСР», был Лауреатом Государственной премии СССР, Лауреатом Государственной премии РФ

в области науки и техники, лауреатом Демидовской премии Научного Демидовского фонда, Лауреатом Премии Правительства РФ в области науки и техники, офицером Ордена Академических пальм (Франция), Почетным членом Международной ассоциации по генезису рудных месторождений (IAGOD). Д. В. Рундквист был первым вице-президентом и президентом Российского минералогического общества, вице-президентом Российского геологического общества, академиком-секретарем ОНЗ.

Память об академике Д. В. Рундквисте навсегда будет с нами.

*Комиссия
по технологической минералогии
РМО*

ПАМЯТИ ВЛАДИМИРА ИВАНОВИЧА КУЗЬМИНА (1932–2022)



В начале 2022 г. ушел из жизни Владимир Иванович Кузьмин, заслуженный геолог РФ, Почетный член Российского минералогического общества, действительный член РАЕН, доктор геолого-минералогических наук. После окончания в 1955 г. МГУ им. М. В. Ломоносова Владимир Иванович

обучался в аспирантуре на кафедре минералогии МГУ, защитил кандидатскую диссертацию на тему «Геологическое строение и минералогия оловорудного месторождения Горное в Приморье». С декабря 1958 г. работал в ВИМСе до выхода на пенсию. В 2010 г. защитил докторскую диссертацию на тему «Научно-методические основы прикладной минералогии при изучении месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых» по специальности 25.00.05 – минералогия, кристаллография.

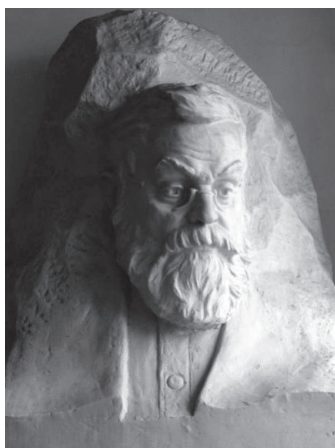
Под руководством В. И. Кузьмина разработаны новые методы минералогических исследований, усовершенствована общая методика изучения вещественного состава руд применительно к различным видам минерального сырья, в первую очередь, тонкодисперсных (железо-марганцевые океанические образования, бокситы, редкометалльные коры выветривания и др.). Владимир Иванович выявил типоморфные особенности ряда минералов (касситерита, магнетита, турмалина, гранатов и др.) и разработал

комплекс поисковых минералогических критериев руд.

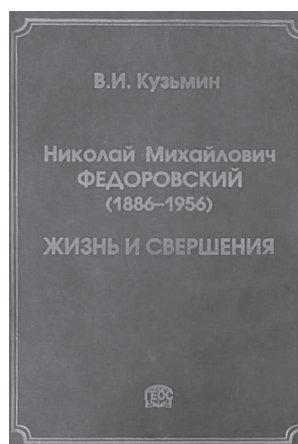
Важное место принадлежит монографии «Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ» (авторы А. И. Гинзбург, В. И. Кузьмин и Г. А. Сидоренко, 1981), в которой показано значение минералогических исследований для повышения эффективности поисково-разведочных работ и рассмотрены задачи технологической минералогии и состояние генетической минералогии.

В. И. Кузьмин активно занимался историей минералогии, историей Института прикладной минералогии (ныне ВИМСа). Он систематизировал и опубликовал материалы по истории ВИМСа, биографии основателя института – В. В. Аршинова и его первого директора Н. М. Федоровского. В этом отношении, необходимо подчеркнуть большое значение выхода в свет книги В. И. Кузьмина «Николай Михайлович Федоровский (1886–1956). Жизнь и свершения». – М.: ГЕОС, 2014. – 200 с. В книге подробно рассмотрен этап работы института и его первого директора. Показаны результаты его деятельности, которые обеспечили создание на основе минерального сырья новых отраслей крупных горнорудных перерабатывающих предприятий страны.

Плодотворная и целеустремленная жизнь Владимира Ивановича – это пример должного служения отечественной науке и геологии. В 2012 году он стал членом Комиссии по технологической минералогии РМО. К взаимному удовлетворению такое предложение было сделано во время работы VII Российского семинара,



Бюст
В. В. Аршинова



Книга о биографии первого директора ВИМСа Н. М. Федоровского (автор В. И. Кузьмин)



Выступление В. И. Кузьмина



В. В. Щипцов и В. И. Кузьмин
в отделе минерального сырья в ВИМСе
(2012)



Члены бюро комиссии по технологической минералогии на встрече
с В. И. Кузьминым. г. Москва, ВИМС. На фото слева направо В. И. Кузь-
мин, Б. И. Пиров, Т. З. Лыгина, Ю. Л. Войтеховский, В. В. Щипцов
(2012)

работа которого проходила в ВИМСе. К тому времени он уже был почетным членом РМО. В одном из писем 2019 года он писал: «Как жаль, что не могу вместе с коллегами участвовать в майском семинаре по технологической минералогии и Юшкинских чтениях. Надеюсь информацию об этих «праздниках ума» получить далее. Желаю провести намеченные яркие мероприятия по плану и с получением новых интересных данных. Успехов и доброго здоровья! Ваш друг и коллега Владимир Кузьмин, а короче ВИК».

Кузьмин В. И. награжден медалями «Ветеран труда», «В память 850-летия Москвы», «За доб-

лестный труд в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина», «В ознаменование 100-летия геологической службы СССР», золотым значком XXV 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.

Память о добром и замечательном человеке навсегда сохранится в наших сердцах.

*Комиссия по технологической
минералогии РМО*

АННОТАЦИИ

УДК 549.08:622

Ожогина Е. Г., Якушина О. А. Будни технологической минералогии // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 7–11: рис. 2. Библ. назв. 11.

Показаны современные направления технологической минералогии. Комплексное минералогическое изучение объектов позволяет решать задачи любой сложности в части оценки качества твердых полезных ископаемых, продуктов их переработки, а также продуктов производства, содержащих минеральную составляющую.

Modern trends in technological mineralogy are shown. The combined study of deposits is conducted to qualitatively assess hard useful minerals, their reworking products, as well as mineral-bearing products.

Ключевые слова: технологическая минералогия, труднообогатимые руды, металлургические шлаки, минералогическое материаловедение, методы минералогического анализа.

Keywords: technological mineralogy, hard-to-enrich ores, metallurgical slags, mineralogical materials science, methods of mineralogical analysis.

УДК 551.735.9:553.04

Зинчук М. Н., Зинчук Н. Н. Особенности измененного вулканогенного материала в связи с геолого-технологическими проблемами в алмазонасных районах Восточно-Сибирской платформы // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 11–16: Библ. назв. 20.

По результатам комплексного исследования особенностей геодинамического и гипергенного изменения вулканогенного материала как в его коренном залегании, так и при переносе, построена схема преобразования минералов в процессе выветривания этого типа образований для территории Восточно-Сибирской платформы. Особое внимание при этом уделено поведению в упомянутых процессах тонкодисперсных глинистых минералов, характерных для различных типов пород. В умеренных климатических поясах (особенно при неполных профилях выветривания) часто размыту подвергался элювиальный материал, который в зависимости от степени преобразования обладает специфическими структурно-минералогическими особенностями, сохраняющимися при недалеком и спокойном переносе, а также при накоплении в бассейнах седиментации и при последующих незначительных диагенетических изменениях.

The results of the combined study of the pattern of geodynamic and hypergene changes in volcanogenic material in bedrock and upon transfer provided a basis for a scheme of mineral alteration provoked by the weathering of this type of rock sequences on the East Siberian Platform. Attention is focused on the behaviour of finely dispersed clayey minerals characteristic of various rock types in the above processes. In temperate climatic belts, especially in incomplete weathering profiles, erosion affected eluvial material, which (depending on the degree of alteration) displays distinctive structural-mineralogical characteristics retained upon quiet short-range transfer, upon accumulation in sedimentary basins and upon subsequent minor diagenetic alterations.

Ключевые слова: гипергенез, вулканогенный материала, седиментогенез и диагенез, Восточно-Сибирская платформа.

Keywords: hypergenesis, volcanogenic material, sediment formation and diagenesis, East Siberian Platform.

УДК 553.6

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Никифоров А. Г., Фролов П. В. Минералого-технологические особенности графитовых руд Фенноскандинавского щита // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 16–23: рис. 5. Библ. назв. 25.

Графит характеризуется как важный минерал для использования в современных высоких технологиях. Показана история исследований графитовых руд на Фенноскандинавском щите. Месторождения и проявления чешуйчатого графита Фенноскандинавского щита переживают второе рождение за счет важной потенциальной базы, внимание к которой стало актуальным на примере динамики развития и оценки в Норвегии, Финляндии и Швеции. Территория Карелии (Приладожье) представляет собой потенциальную область проведения исследований с использованием современных аналитических методов по оценке графитовой формации на суперчистоту.

Graphite is described as an important mineral used in modern high technologies. The background of the study of graphite ores on the Fennoscandian Shield is discussed. On the Fennoscandian Shield, flake graphite deposits have attracted great attention again due to their evolution dynamics and assessment in Norway, Finland and Sweden. Karelia (Ladoga Lake area) is a potential region for conducting research using up-to-date analytical methods for assessment of the superpurity of graphite.

Ключевые слова: чешуйчатый графит, Фенноскандинавский щит, рудные зоны, Ихала.

Keywords: flake graphite, Fennoscandian Shield, ore province, Ihala.

УДК 553.3.072

Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С. Роль минералогических исследований при разработке технологии комплексной переработки оловянных руд // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 23–27: рис. 3. Библ. назв. 12.

В статье рассмотрена важность проведения минералого-технологических исследований на оловорудных месторождениях на примере комплексной руды Правоурмийского месторождения. Приведены данные по текстурно-структурным особенностям руд, их составу, формам нахождения ценных компонентов, доказывающие принадлежность таких руд к типу труднообогатимых. Обоснована важность применения методов технологической минералогии на всех этапах освоения оловорудных объектов с применением современных аналитических методов.

The importance of conducting mineralogotechnological studies at tin deposits is discussed using ore from the Praviurminskoye deposit as an example. Data on the textural-structural characteristics, composition and mode of occurrence of valuable components are reported. They show that the ores are difficult to dress. It is shown why the application of technological mineralogy methods is essential at all stages in the development of tin deposits using up-to-date analytical methods.

Ключевые слова: оловорудные месторождения, комплексные руды, минералого-технологическая оценка.

Keywords: tin deposits, complex ores, mineralogical and technological assessment.

УДК 553.087

Левченко Е. Н. Минералого-технологические особенности редкометалльных кор выветривания // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 28–33: рис. 6, табл. 1. Библ. назв. 7.

Рассмотрены современные задачи минералоготехнологических исследований руд редкометалльных месторождений. Основное внимание уделено специфике изучения и переработке комплексного редкометалльного сырья. На примере конкретных объектов представлены результаты изучения особенностей вещественного состава редкометалльных кор выветривания.

Modern problems in the mineralogical and technological studies of ores from rare-metal deposits are discussed. Attention is mainly focused on the specificity of the study and reworking of complex rare-metal

materials. Some deposits are used are discussed to assess the results of the study of the mineralogical composition of rare-metal weathering crusts.

Ключевые слова: редкометалльные руды, коры выветривания, минералогические исследования, технологические испытания.

Keywords: rare metal ores, weathering crusts, mineralogical studies, technological tests.

УДК 669.2

Турсебеков А. Х., Мирходжаев Б. И., Шарфутдинов У. З., Садыкова Л. Р., Шукуров Ш. Р., Файзиев Ф. Ф., Рашидов Н. И. Технологическая геохимия и минералогия совмещенных во времени и пространстве высококомплексных V, U, Cu, Mo, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Re, W, Sc, редкоземельных (Y>Ce) руд – новый тип полиминерально-редкометалльного сырья (Узбекистан) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 33–36: рис. 1, табл. 9. Библ. назв. 7.

В настоящее время в Республике Узбекистан установлены два генетических типа месторождений урана: гидрогенный и полигенный в углеродистокремнистых сланцах. В результате детальных исследований высококомплексных полигенных уран-ванадиевых месторождений Рудное и Новое была установлена геохимическая система элементов в виде катионов и анионов, участвовавших в формировании данных месторождений.

Two genetic types of uranium deposits: hydrogenic and polygenic in carbonaceous-siliceous schists were shown to occur in the Republic of Uzbekistan. A detailed study of the Rudnoe and Novoe highly complex polygenic uranium-vanadium deposits has revealed a geochemical system of elements in the form of cations and anions involved in the formation of the above deposits.

Ключевые слова: гипергенез, вулканогенный материал, седиментогенез и диагенез, Восточно-Сибирская платформа.

Keywords: hypergenesis, volcanogenic material, sediment genesis and diagenesis, East Siberian platform.

УДК: 549.08

Раков Л. Т. Возможности методов ЭПР и LA-ICP-MS в оценке качества кварцевого сырья // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 37–42: рис. 2, табл. 1. Библ. назв. 16.

Проведено обобщение материалов исследований кварца, выполненных различными методами за последние годы. Сделан вывод о целесообразности

совместного применения методов ЭПР и LA-ICP-MS в анализе образцов кварцевого сырья. Показано, что их сочетание открывает возможность определения форм нахождения в матрице кварца примеси Al, устранение которой в процессе передела кварцевого сырья сопряжено с большими трудностями. Полученные данные могут использоваться при оценке качества сырья и выявлении перспектив его очистки.

The results of studies of quartz carried out in the past few years using various methods are generalized. ESR and LA-ICP-MS methods can be used together to analyze quartz samples and to determine the forms of occurrence Al impurity in quartz matrix, which is hard to remove upon quartz conversion. The data obtained can be used for appraising the quality and purification potential of quartz.

Ключевые слова: особо чистый кварц, элементы примеси, ЭПР, LA-ICP-MS.

Keywords: high purity quartz, trace elements, ESR, LA-ICP-MS.

УДК 622.721

Красюкова Т. О., Азарян А. М., Анисимов И. С., Васильев А. М., Баданина Е. В., Агапов И. А. Вещественный состав руд месторождения золота Кутын // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 43–47: рис. 6, табл. 2. Библ. назв. 4.

Приведены результаты изучения проб геотехнологического картирования (ГТК) месторождения Кутын (Хабаровский край), представленных упорными золотыми рудами с низкой долей цианируемого золота. Состав изученных проб карбонат-серицит-полевошпат-кварцевый. Корреляционные связи между содержаниями минералов и элементов свидетельствуют о наличии шести основных минерально-элементных ассоциаций. Ввиду существенных вариаций извлечения золота как флотацией, так и цианированием на основании степени окисленности мышьяка были выделены три сорта руд. Рассчитана возможная модель прогноза извлечения золота во флотоконцентрат.

The results of mineralogical and metallurgical study of selected geometallurgical samples of partially oxidized ores with low gold cyanide leaching recovery from Kutyn deposit are presented. The samples had carbonate-sericite-feldspar-quartz composition. Correlations between contents of minerals and elements indicate presence of six main mineral-elemental associations. Three classes of ore were distinguished based on arsenic oxidation degree due to significant variations in gold recovery by both flotation and cyanidation. Potential prediction model for gold recovery by flotation according to the ore composition was proposed.

Ключевые слова: месторождение Кутын, упорные золотые руды, геотехнологическое картирование.

Keywords: Kutyn deposit, refractory gold ore, geometallurgy, recovery prediction.

УДК 553.641:549+622.7

Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. К., Чернявский А. В. Формы апатита в рудах Хибинского массива и их влияние на обогащение // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 47–52: рис. 4, табл. 2. Библ. назв. 20.

В статье рассмотрены основные формы зерен апатита в апатит-нефелиновых рудах, структуры которые он образует и особенности раскрытия минерала при измельчении руды. Показано, что апатит как главный рудный минерал, составляет основу руды и кристаллизуется как магматический минерал в панидиоморфно-зернистой структуре. Эта структура является главной в рудах и характеризует их как легко разрушающиеся, вследствие слабых физических свойств апатита. Вместе с тем, в составе руды присутствуют более сложные ассоциации, представленные пойкилитовыми кристаллами более прочных, нежели апатит, минералов – нефелином, пироксеном и титанитом. Пойкилитовые кристаллы содержат включения мелких зерен апатита. Присутствие «пойкилитового» апатита усложняет процесс измельчения и раскрытия апатита.

Major apatite grain shapes in apatite-nepheline ores, structures formed by apatite and the characteristics of mineral opening displayed upon ore grinding are discussed. It is shown that apatite is a basic ore mineral of ore. It is crystallized as an igneous mineral in panidiomorphic texture. It is a major texture in the ore, showing that it is easily destroyed due to the weak physical properties of apatite. However, the ore contains more complex associations occurring as poikilitic crystals of minerals, which are harder than apatite, such as nepheline, pyroxene and titanite. Poikilitic crystals carry fine apatite crystal inclusions. The presence of «poikilitic» apatite makes it hard to grind and open apatite.

Ключевые слова: апатит-нефелиновая руда, Хибинский массив, раскрытие минералов.

Keywords: apatite-nepheline ore, Khibiny massif, mineral opening.

УДК 537.533.35

Долотова А. В., Анисимов И. С., Харитонов М. С., Агапов И. А. Формы нахождения золота в продуктах переработки окисленной руды месторождения Майское // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 53–58: рис. 11. Библ. назв. 2.

Золоторудное месторождение Майское относится к кварц-золото-сульфидной формации в терригенных толщах расположено на Чукотке, Россия. На месторождении выделены два основных технологических типа руд: первичные и окисленные. Окисленные руды имеют кварц-слюдистый состав с примесью полевых шпатов, скородита, ярозита и сульфидов. Первичная руда месторождения Майское относится к дважды упорным. В окисленной руде 1-ой рудной зоны золото рассеяно также в скородите, окисленных формах сурьмы и на угле. Основные потери металла в окисленной руде связаны с скородитом, природным углем, с нерудными минералами и в золотосодержащих сульфидах, которые находятся в сростках с нерудными минералами и в свободных зернах.

The Maiskoye gold deposit occurs as part of a quartz-gold-sulphide formation in terrigenous rock sequences in Chukotka, Russia. Two main technological ore types: primary and oxidized were identified at the deposit. Oxidized ores are composed of quartz and mica with feldspar, scorodite, jarosite and sulphides. Gold in the oxidized ore of ore zone 1 is disseminated also in scorodite, oxidized forms of antimony and on coal. The main loss of metal in oxidized ore is due to the presence of scorodite, natural coal, non-metallic minerals and gold-bearing sulphides, which are intergrown with non-metallic minerals and also occur in free grains.

Ключевые слова: невидимое золото, коллоидное золото, упорные золотые руды, золото с углем.

Keywords: invisible gold, colloidal gold, refractory gold, preg-robbing.

УДК 553.41

Кевлич В. И., Фролов П. В., Тытык В. М., Мастрюкова С. В. Уеологическое и минералого-технологическое изучение альбититов золоторудного месторождения Новые Пески (Республика Карелия) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 59–63: рис. 6. Библ. назв. 10.

В статье рассмотрена специфика редкометалльной и редкоземельной минерализации альбититов, выявленных в карьере золоторудного месторождения Новые Пески Улялегского рудного поля Южной Карелии. Полученные данные расширяют возможности комплексного использования минерального сырья объекта Новые Пески и перспективы Улялегского рудного поля на различные виды полезных ископаемых.

The distinctive characteristics of rare-metal and rare-earth mineralization of albitites, revealed in the quarry of the Novye Pesky gold deposit (Ulyalega Ore Field, South Karelia), are discussed. The data obtained increase the application range of Novye Peski mineral products

and various commercial minerals from the Ulyalega Ore Field.

Ключевые слова: альбититы, месторождение Новые Пески, редкие металлы, РЗЭ, минеральное сырье.

Keywords: albitites, Novye Peski deposit, rare metals, REE, raw minerals.

УДК 549.757

Гизатуллина А. А., Анисимов И. С. Изменение минерального состава золотых концентратов при переработке в процессе *Pox – Hot cure* // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 64–68: рис. 4, табл. 2. Библ. назв. 2.

Изучен общий минеральный состав кеков автоклавного окисления в зависимости от времени проведения процесса *Hot Cure*. Исследования проводились на шихтах золотых концентратов при разном времени выдержки в процессе *Hot Cure*. Наблюдается уменьшение количества основных арсенатов-сульфатов железа и рост количества скородита при увеличении времени проведения *Hot Cure*.

Alteration of mineral composition of the POX treated gold concentrate during *Hot Cure* process was examined. The study was carried out on *Hot Cure* discharge with different exposure time. Significant decrease in the amount of basic ferric arsenates-sulfates and an increase for scorodite was noted with duration of the *Hot Cure*.

Ключевые слова: *Hot Cure*, горячее кондиционирование, автоклавное окисление, скородит, основные арсено-сульфаты железа, ярозит.

Keywords: *Hot Cure*, hot pulp conditioning, pressure oxidation, scorodite, BFAS, jarosite.

УДК 553.068.57

Соленикова Е. О. Минералы группы граната в прибрежно-морских россыпях Белого моря: состав, особенности, диагностика // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 68–74: рис. 5, табл. 6. Библ. назв. 5.

В статье приведены данные по морфоструктурным особенностям минералов группы граната из прибрежно-морских россыпей Архангельской области, а также по составу включений в гранате.

Data on the morphostructural characteristics of garnet-group minerals from sea coast placers in the Arkhangelsk region and the composition of inclusion in garnet are reported.

Ключевые слова: гранат, россыпь, включения, состав граната, минал.

Keywords: garnet, placer, inclusions, garnet composition, minal.

УДК 549.08

Лихникевич Е. Г. Химико-металлургические методы при переработке минерального сырья: минералогические аспекты // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 75–77: Библ. назв. 5.

Рассмотрены минералогические аспекты, определяющие технологические свойства руд и продуктов их переработки с выбором оптимального способа химико-металлургического передела.

Mineralogical aspects, responsible for the industrial properties of ores and their reworking products using an optimum method for chemical and metallurgical processing are discussed.

Ключевые слова: редкометалльные руды, концентраты, обогащение, гидрометаллургия, пирометаллургия.

Keywords: rare-metal ores, concentrates, dressing, hydrometallurgy, pyrometallurgy.

УДК 553.494 (470.21)

Соколов С. В. Перовскит и титанит – возможные нетрадиционные источники титана (на примере месторождения Африканда) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 77–81: табл. 3. Библ. назв. 14.

Стратегический элемент титан находит широкое применение в разных сферах промышленности Российской Федерации. Однако месторождения традиционных типов титановых руд с учтёнными запасами (коренные ильменит-титаномagnetитовые ± апатит, титаномagnetитовые, лейкоксен-кварцевые и россыпные с цирконом, рутилом, ильменитом) пока не достигли стадии промышленного освоения. Поэтому ставится задача использования нетрадиционных минеральных типов руд (например, перовскитовых и титанитовых). Месторождение Африканда является одним из крупнейших по ресурсам титана на Кольском полуострове. В статье излагаются результаты изучения отобранной на этом месторождении технологической титаномagnetит-перовскитовой пробы, полученного в процессе флотационного обогащения титанитсодержащего перовскитового концентрата и его переработки до конечных продуктов способом автоклавного азотнокислотного вскрытия. Полученные результаты показали практически полное разложение перовскита и титанита при селективном отделении Ti от Ca, Fe, Nb, Ta и REE.

Titanium, a strategic element, is widely used in various industries in the Russian Federation. However, titanium ore deposits of conventional types with appraised reserves (ilmenite-titanomagnetite ± apatite, titanomagnetite and

leucoxene-quartz bedrock deposits, as well as placers with zircon, rutile and ilmenite) have not been mined yet on a commercial scale. Therefore, our aim is to use non-conventional mineral types of ores, e. g. perovskite and titanite ores. The Afrikanda deposit is one of the biggest titanium deposits on the Kola Peninsula. The author discusses the results of the study of a technological titanomagnetite-perovskite sample from the deposit produced by flotation dressing of titanium-bearing concentrate and its reworking to end products by autoclave nitric acid. The results obtained show the complete decomposition of perovskite and titanite upon selective separation of Ti from Ca, Fe, Nb, Ta and REE.

Ключевые слова: перовскит, титанит, нетрадиционные типы руд, месторождение Африканда, флотационное обогащение.

Keywords: perovskite, titanite, non-conventional ore types, Afrikand deposit, flotation dressing.

УДК 552.122

Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Прогноз обогатимости руд на основе статистического анализа структур // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 81–85: рис. 4, табл. 2. Библ. назв. 6.

В статье рассматривается применение статистического подхода к анализу структур руд, основанного на подсчете вероятностей межзерновых контактов. Подход позволяет строго определить структурные типы и выявить различия между рудами близкого состава. На примере апатитовых руд Хибин и железных руд Костомукши установлена зависимость между структурным типом руды и степенью извлечения полезного минерала. Предлагается использование подхода для решения минералого-технологических задач.

The application of a statistical approach to analysis of ore structures based on calculation of the probabilities of intergranular contacts is discussed. The approach is used to strictly identify structural types and to reveal differences between ores which are similar in composition. Khibiny apatite ores and Kostomuksha iron ores are discussed to find a relationship between the structural type of ore and the degree of recovery of a useful mineral. The approach is proposed for solving mineralogo-technological problems.

Ключевые слова: межзерновые контакты, структурный тип, обогатимость, апатитовая руда, железная руда.

Keywords: intergranular contacts, structural type, washability, apatite ore, iron ore.

УДК 549.02:628.477

Лавриненко А. А., Кунилова И. В., Сыса П. А., Шимкунас Я. М. Исследование особенностей состава золы электрофильтров, уловленной при сжигании углей на Омской ТЭЦ-4 // Технологическая

минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2022. С. 85–87: рис. 1, табл. 2. Библ. назв. 4.

С использованием современных методов анализа проведено исследование состава и микроструктуры золы от сжигания каменных углей. Отмечено наличие спекшихся агрегатов и тонкой вкрапленности частиц различной минеральной природы, а также неравномерность распределения микроэлементов (Mn, Zr, V, Co, Ce, Y), что необходимо учитывать при разработке комплексных технологий их попутного извлечения.

The composition and microstructure of ash from coal burning were studied using up-to-date analytical methods. Caked aggregates, finely disseminated particles differing in mineral genesis and irregular trace element (Mn, Zr, V, Co, Ce and Y) distribution are noted. This should be taken into account when developing combined technologies for their recovery.

Ключевые слова: зола, утилизация техногенных отходов, элементы-примеси.

Keywords: ash, artificial waste utilization, impurity elements.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Ожогина Е. Г., Якушина О. А. Будни технологической минералогии	7
Зинчук М. Н., Зинчук Н.Н. Особенности измененного вулканогенного материала в связи с геолого-технологическими проблемами в алмазоносных районах Восточно-Сибирской платформы	11
Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Никифоров А. Г., Фролов П. В. Минералого-технологические особенности графитовых руд Фенноскандинавского щита	16
Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С. Роль минералогических исследований при разработке технологии комплексной переработки оловянных руд	23
Левченко Е. Н. Минералого-технологические особенности редкометалльных кор выветривания	28
Турсебеков А. Х., Шарипов Х. Т., Мирходжаев Б. И., Шарафутдинов У. З., Садыкова Л. Р., Шукуров Ш. Р., Файзиев Ф. Ф., Рашидов Н. И. Технологическая геохимия и минералогия совмещенных во времени и пространстве высококомплексных V, U, Cu, Mo, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Re, W, Sc, редкоземельных (Y>Ce) руд - новый тип полиминерально-редкометалльного сырья (Узбекистан)	33
Раков Л. Т. Возможности методов ЭПР и LA-ICP-MS в оценке качества кварцевого сырья	37
Красюкова Т. О., Азарян А. М., Анисимов И. С., Васильев А. М., Баданина Е. В., Агапов И. А. Вещественный состав руд месторождения золота Кутын	43
Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. А., Чернявский А. В. Формы апатита в рудах Хибинского массива и их влияние на обогащение	47
Долотова А. В., Анисимов И. С., Харитонов М. С., Агапов И. А. Формы нахождения золота в продуктах переработки окисленной руды месторождения Майское	53
Кевлич В. И., Фролов П. В., Тытык В. М., Мاستрюкова С. В. Геологическое и минералого-технологическое изучение альбититов золоторудного месторождения Новые Пески (Республика Карелия)	59
Гизатуллина А. А., Анисимов И. С. Изменение минерального состава золотых концентратов при переработке в процессе Rox-Hot cure	64
Соленикова Е. О. Минералы группы граната в прибрежно-морских россыпях Белого моря: состав, особенности, диагностика	68
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Лихникевич Е. Г. Химико-металлургические методы при переработке минерального сырья: минералогические аспекты	75
Соколов С. В. Перовскит и титанит – возможные нетрадиционные источники титана (на примере месторождения Африканда)	78
Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Прогноз обогатимости руд на основе статистического анализа структур	81
Лавриненко А. А., Кунилова И. В., Сыса П. А., Шимкунас Я. М. Исследование особенностей состава золы электрофилтров, уловленной при сжигании углей на Омской ТЭЦ-4	85
К ЮБИЛЕЮ	
Пирогов Борис Иванович	88
ПОТЕРИ НАУКИ	
Памяти Рундквиста Дмитрия Васильевича	92
Памяти Кузьмина Владимира Ивановича	94
АННОТАЦИИ	96

CONTENT

PREFACE	5
Ozhogina E. G., Yakushina O. A. Trivial side of technological mineralogy	7
Zinchuk M. N., Zinchuk N. N. Characteristics of altered volcanogenic material in connection with geologo-technological problems in the diamondiferous areas of the East Siberian Platform	11
Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Nikiforov A. G., Frolov P. V. Mineralogo-technological characteristics of graphite ores on the Fennoscandian Shield	16
Chikisheva T. A., Komarova A. G., Prokopyev S. A., Prokopyev E. S. Role of mineralogical studies in the development of combined tin ore processing technology	23
Levchenko E. N. Mineralogo-technological characteristics of rare-metal weathering crusts	28
Turesebekov A. H., Sharipov H. T., Mirkhodzhaev B. I., Sharafutdinov U. Z., Sadykova L. R., Shukurov Sh. R., Faiziev F. F., Rashidov N. I. Technological geochemistry and mineralogy of highly complex V, U, Cu, Mo, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Re, W, Sc, rare-earth (Y>Ce) ores combined in time and space – a new type of a polymineral-rare-metal raw material (Uzbekistan)	33
Rakov L. T. Potential of the EPR and LA-ICP-MS methods for qualitative appraisal of quartz as a raw material	37
Krasyukova T. O., Azaryan A. M., Anisimov I. S., Vasiliev A. M., Badanina E. V., Agapov I. A. The composition of ores of the Kutyn gold deposit	43
Neradovsky Y. N., Kompanchenko A. A., Chernyavsky A. V. Forms of apatite in Khibiny ores and their effect on dressing	47
Dolotova A. V., Anisimov I. S., Kharitonova M. S., Agapov I. A. Forms of gold in oxidized ore reworking products from the Maiskoe deposit	53
Kevlich V.I., Frolov P.V., Tytyk V.M., Mastryukova S.V. Geological and mineralogo-technological study of albitites from the Novye Peski gold deposit, Republic of Karelia	59
Gizatullina A. A., Anisimov I. S. Alteration of the mineral composition of gold concentrates during POX-Hot cure process	64
Solenikova E. O. Garnet-group minerals in White Sea coast placers: composition, characteristics and diagnostics	68
SHORT COMMUNICATIONS	
Likhnikovich E. F. chemical-metallurgical methods for processing of mineral products: mineralogical aspects	75
Sokolov S. V. Perovskite and titanite as possible non-conventional sources of titanium: case study of the Afrikanda deposit	78
Zakharova A. A., Voitekhovsky Yu. L. Forecast of ore dressability based on statistical analysis of structures	81
Lavrinenko A. A., Kunilova I. V., Sysa P. A., Shimkunas Ya. M. Study of the characteristics of the composition of electrical filter ash trapped upon burning coal at Omsk Heat Power Plant-4	85
TOWARDS THE JUBILEE	
Pirogov Boris Ivanovich	88
SCIENTISTS WE HAVE LOST	
In memory of Dmitry Vasilyevich Rundkvist	92
In memory of Vladimir Ivanovich Kuzmin	94
ABSTRACTS	96

Научное издание

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ
В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

Сборник статей по материалам докладов
XIV Российского семинара по технологической минералогии

*Печатается по решению Ученого совета
Института геологии КарНЦ РАН*

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 14.11.2022. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Уч.-изд. л. 11,0. Усл.-печ. л. 12,09.
Тираж 100 экз. Заказ № 738

Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр Российской академии наук»
Редакционно-издательский отдел
185030, г. Петрозаводск, пр. А. Невского, 50