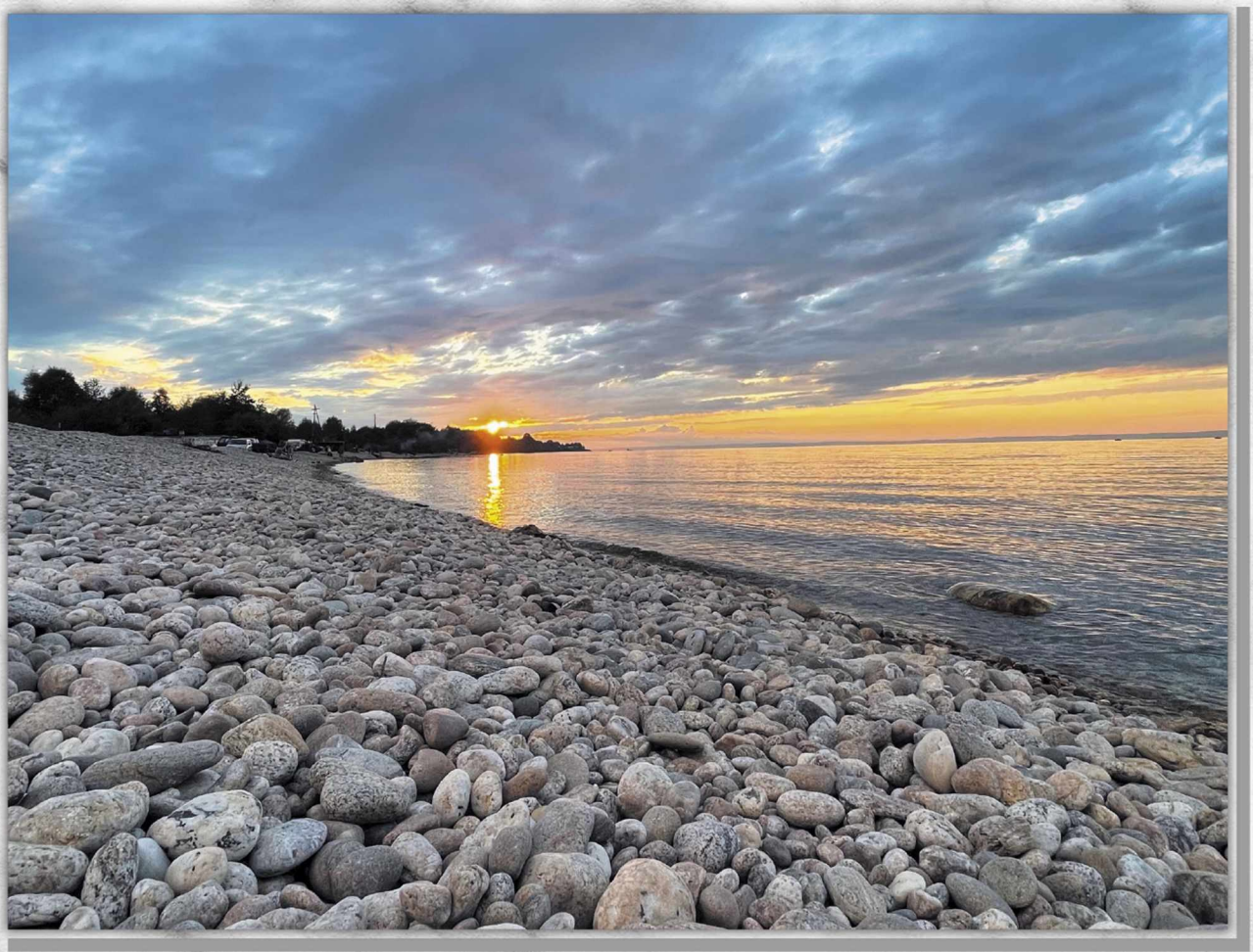
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сборник статей по материалам докладов
XV Российского семинара
по технологической минералогии



2023

RUSSIAN MINERALOGICAL SOCIETY
COMMISSION ON TECHNOLOGICAL MINERALOGY

FEDERAL RESEARCH CENTRE
«KARELIAN RESEARCH CENTRE, RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES»
INSTITUTE OF GEOLOGY

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

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

Irkutsk, May, 17–18, 2023

Petrozavodsk
2023

РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

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



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сборник статей по материалам докладов
XV Российского семинара по технологической минералогии

Иркутск, 17–18 мая 2023 г.

Петрозаводск
2023

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 XV Российского семинара по технологической минералогии, Иркутск, 17–18 мая 2023 г. / под редакцией В. В. Щипцова, Е. Н. Световой ; Российское минералогическое общество, Комиссия по технологической минералогии, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Институт геологии КарНЦ РАН. – Петрозаводск : КарНЦ РАН, 2023. – 82 с.

УДК 622.7.017(063)
ББК 33.4

ISBN 978-5-9274-0982-2

© Российское минералогическое общество, 2023
© ФИЦ «Карельский научный центр РАН», 2023
© Институт геологии КарНЦ РАН, 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый вниманию читателей сборник научных статей содержит материалы докладов XV Российского семинара по технологической минералогии «Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения». Семинар впервые провел свою работу на базе Института земной коры СО РАН в Иркутске (17–18 мая 2023 г). В организации этого мероприятия приняли участие Комиссия по технологической минералогии РМО, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт земной коры РАН», ООО НПК «Спирит», Институт геологии Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН».

Научная программа семинара охватывала следующие направления: 1. Технологическая минералогия в решении проблем комплексной и экологически безопасной переработки минерального сырья России; 2. Применение современных методов и подходов в исследованиях вещественного состава твердых полезных ископаемых и перспективы интенсификации технологии обогащения минерального сырья; 3. Использование ГИС в оценке полезных ископаемых.

Программа была ориентирована на решение проблем комплексного и экологически безопасного освоения месторождений, изучение вещественного состава минерального сырья с использованием современных прецизионных аналитических методов и ГИС-технологий. Ключевые доклады были посвящены роли технологической минералогии в оценке полезных ископаемых различных типов и решению проблем комплексной переработки природного минерального сырья и горнопромышленных отходов.

В работе семинара участвовали около 100 человек, представляющие следующие организации: Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск; Институт геохимии СО РАН им. А. П. Виноградова, г. Иркутск; Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ; Институт геологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск; Институт геологии ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», г. Сыктывкар; ООО НПК «Спирит», г. Иркутск; ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского», Москва; Иркутский государственный университет, Иркутск; ООО «Плазлэй», г. Зеленоград; ФГБОУ ВО «Саратовский НИГУ им. Н. Г. Чернышевского», г. Саратов; ООО «СИАМС», г. Екатеринбург. Помимо очного участия, в работе участвовали в форме on-line представители Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург; Уфимского университета науки и технологий, г. Уфа; Института геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск; Института геологии и минералогии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск; Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург; Северного (Арктического) федерального университета им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск; Института биологии ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», г. Сыктывкар; Института проблем комплексного освоения недр РАН, Москва.

На семинаре состоялось два пленарных доклада, 28 устных секционных и 4 стендовых докладов. Для участников семинара были организованы экскурсии в научный музей ИЗК СО РАН, лабораторию ТПИ отдела комплексного использования минерального сырья, центр коллективного пользования «Геодинамика и геохронология», центр комплексного мониторинга опасных геологических процессов.

Семинар по технологической минералогии был проведен на высоком научном уровне благодаря Институту земной коры СО РАН.

Напомним, что Российские семинары по технологической минералогии регулярно проводятся с 2006 года. К настоящему времени усилиями Комиссии по технологической минералогии РМО издано 15 сборников научных трудов, посвященных актуальным вопросам технологической минералогии. Ниже в хронологической последовательности выпусков приведем названия соответствующих изданий. Электронные версии большинства из них можно найти на официальном сайте Института геологии КарНЦ РАН.

1. Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Материалы первого Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 163 с
2. Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья. Материалы второго Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 200 с.
3. Новые методы технологической минералогии при оценке руд металлов и промышленных минералов Сборник статей по материалам III Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 187 с.
4. Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Сборник статей по материалам IV Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 192 с.
5. Минералого-технологическая оценка месторождений полезных ископаемых и проблемы раскрытия минералов. Сборник статей по материалам V Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 242 с.
6. Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах. Сборник статей по материалам VI Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 162 с.
7. Прогнозная оценка технологических свойств полезных ископаемых методами прикладной минералогии. Сборник статей по материалам докладов VII Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 188 с.
8. Технологическая минералогия в оптимизации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья. Сборник статей по материалам докладов VIII Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2014. 197 с.
9. Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений. Сборник статей IX Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 171 с.
10. Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья: сборник статей по материалам X Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 161 с.
11. Результаты междисциплинарных исследований в технологической минералогии. Сборник статей XI Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2017. 164 с.
12. Фундаментальные и прикладные аспекты технологической минералогии. Материалы докладов секции «Проблемы прикладной (поисковой, технологической и экологическоой) минералогии Юбилейного съезда РМО «200 лет РМО». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 118 с.
13. Роль технологической минералогии в рациональном недропользовании. Материалы Российского совещания с международным участием. Москва: ВИМС, 2018. 234 с.
14. Минералого-технологическая оценка новых видов минерального сырья: сборник статей по материалам XII Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2019. 117 с.
15. Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения: сборник статей по материалам докладов XIV Российского семинара по технологической минералогии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 104 с.

DOI: 10.17076/TM15_49

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ: МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ И СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ

Котова О. Б.[1], Ожогина Е. Г.[2]

[1] Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», Сыктывкар
[2] Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Москва

Главные проблемы развития отечественной минерально-сырьевой базы сегодня связаны не только с отсутствием крупных и богатых объектов, вынужденным вовлечением в переработку бедных труднообогатимых руд, нередко локализованных в сложных горно-геологических условиях, но и с «недоразведанностью, необеспеченностью проектной документацией, несовершенством технологий добычи и переработки». В настоящее время Россия вынуждена импортировать руды, например марганцевые, титановые, литиевые, несмотря на то, что запасы этого сырья в стране значительны. Для обеспечения технологической независимости требуется создание полного цикла производства продукции от исходного сырья до конечного изделия. Совершенно очевидно, что решение этой задачи должно базироваться на достоверной максимально полной минералогической информации о сырьевом объекте, которая позволит определить судьбу конкретных полезных ископаемых в комплексном освоении минерального сырья в целом. Однако, следует отметить, что объем минералогических исследований и их детальность при проведении геологоразведочных работ, в том числе технологических испытаний заметно снижаются [1].

Главная цель технологической минералогии – создание научно-методического обоснования рационального недропользования, в том числе комплексного использования минерального сырья, направленного на развитие отечественной минерально-сырьевой базы (МСБ) твердых полезных ископаемых в свете глобальных вызовов современных экономической и экологической доктрин [4, 5]. В настоящей обстановке технологическая минералогия «составляет фундамент, без которого на современном уровне невозможен целенаправленный научный поиск как принципиально новых путей развития, так и совершенствования технологии переработки минерального сырья [3].

Геологическое изучение и последующее вовлечение в промышленную переработку сложных комплексных руд определяют необходимость их комплексной оценки уже на ранних стадиях геологоразведочных работ, которую целесообразно проводить методами прикладной минералогии. В первую очередь это относится к рудам критических металлов: титана, марганца, тантала, ниобия, лития, бериллия и др. (Перечень поручений Президента…, направленных на развитие перспективной минерально-сырьевой базы (28 июня 2023, Пр-1130). Оценка руд критических металлов всегда предусматривает не только определение их качества и технологических свойств, но и возможность или невозможность замены данного сырья другим.

Приоритетной задачей современного общества является переработка техногенного сырья – горнопромышленных отходов, которые всегда отличаются от природных полезных ископаемых и поэтому, несомненно, требуют глубокого минералогического изучения. Комплексная оценка техногенных объектов позволяет установить целесообразность и эффективность их вовлечения в МСБ страны и в дальнейшем их промышленную переработку.

В качестве примера оценки качества горнопромышленных отходов рассмотрим золошлаки, сформированные практически на 90 % материалом крупностью менее 0,01 мм. Основными породообразующими компонентами являются (%): Al_2O_3 – (19–26), SiO_2 – (45–47), Fe_2O_3 – (10–13), Na_2O – (0,85–1), K_2O – (3), CaO – (2). Фазовый состав шлаков достаточно пестрый. В легкой фракции плотностью менее 2.9 г/см^3, на долю которой приходится до 98 % материала, концентрируются кварц, кальцит, муллит, шпинель, корунд. В тяжелой фракции, массовая доля которой не превышает 4 %, присутствуют магнитные (90 %) и стеклянные (6 %) округлые образования («шарикими»), в резко подчиненном количестве

отмечаются стекло, шпинель, кварц, карбонаты, иногда встречаются полевой шпат, корунд, хлорит, мусковит, роговая обманка, сажа.

Практический интерес в данном случае представляет алюмосиликатная матрица золошлаков содержание которой в легкой фракции составляет 81–87%. Электронно-микроскопическое изучение показало, что она сформирована сформирована плотно прилегающими округлыми (шаровидными) образованиями разного размера (рис. 1). Элементный состав таких образований непостоянный. При доминирующей роли кремнезема (45–50%) и глинозема (27–32%), в них варьирует содержание Fe_2O_3 от 8% до 20% и CaO от 1.8% до 4%. В незначительном количестве всегда отмечается SO_3. Методом просвечивающей электронной микроскопии обнаружены аморфные шаровидные выделения размером менее 50 нм (рис. 2), имеющие неоднородную, волокнистую поверхность. По составу они железо-кремнистые с примесью глинозема.

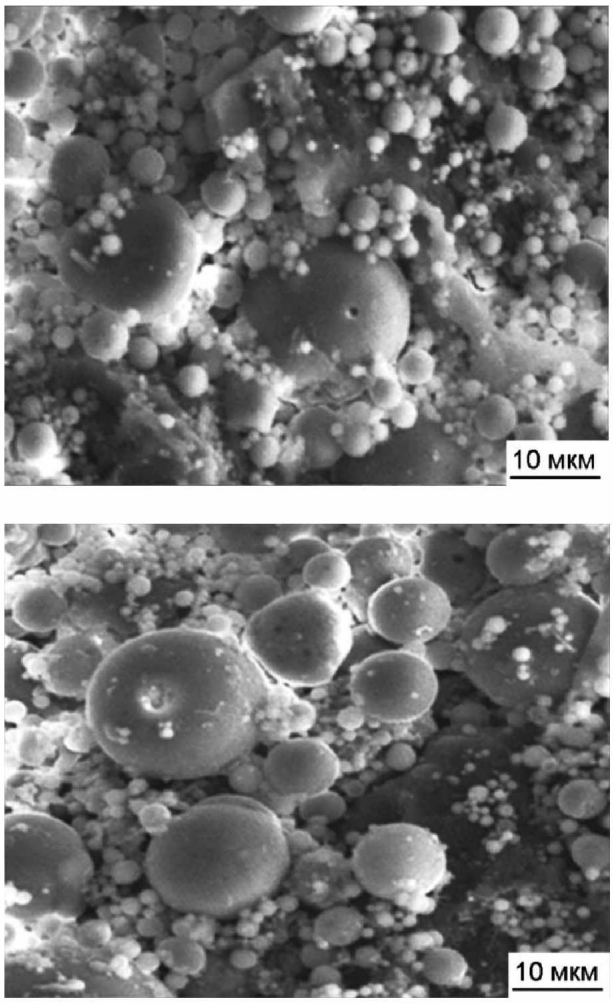


Рис. 1. Полые разноразмерные шаровидные образования. РЭМ

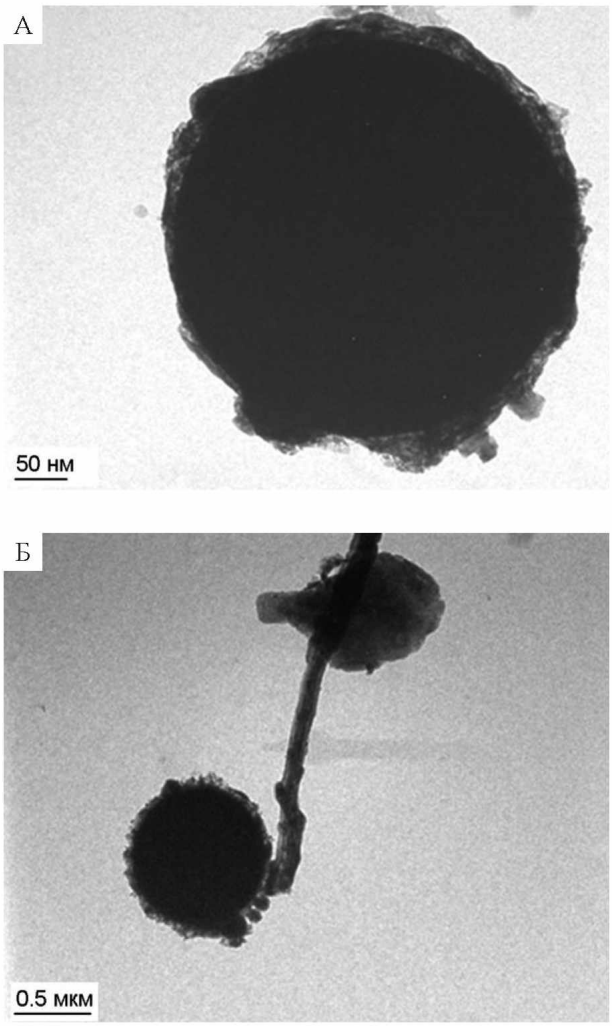


Рис. 2. А – Аморфное округлое образование с волокнистой поверхностью. Б – Аморфное образование с неоднородной поверхностью и графитовая нанотрубка. ПЭМ

Особенности фазового состава и строения золошлаков позволяют говорить о невозможности извлечения из них металлических фаз. При разработке соответствующих технологий можно рассматривать эти отходы в качестве алюмосиликатного сырья. В ближайшей перспективе их можно использовать в качестве сырья для стройиндустрии.

Глубина минералогического изучения твердых полезных ископаемых определяется не только конкретными научно-исследовательскими и производственными задачами, но и возможностями (приборными, методическими, кадровыми) организаций, выполняющих эти работы.

Основными требованиями, предъявляемыми сегодня к оценке минерального сырья, являются: направленность на ресурсосбережение и повышение глубины переработки, системный

и комплексный подход, применение инновационных технических и технологических решений, достоверность, исключение субъективных факторов, экологичность используемых методов и обоснованность выводов и рекомендаций.

Отличительной чертой современной технологической минералогии является интенсивное внедрение количественных методов анализа, позволяющих получать достоверную, сопоставимую, имеющую юридическую силу информацию о составе и строении руд, горных пород и продуктов их переработки, и определяет необходимость метрологического обеспечения минералогических работ. Для получения объективной информации о морфоструктурном составе твердых полезных ископаемых требуется научно обоснованный комплекс методов минералогического анализа, обеспечивающий единство и требуемую точность определений, достоверные результаты при минимальных затратах. В этом случае метрологический контроль становится обязательной составляющей технологической минералогии.

Главным требованием к минералогической информации является сопоставимость результатов анализов, которая обеспечивается применением аттестованных методик и проведением внутреннего и внешнего лабораторного контроля. Наиболее рациональным инструментом внешнего контроля принято считать межлабораторные сличительные испытания (МСИ), позволяющие оценивать достоверность результатов анализов, полученных в каждой отдельной лаборатории и дающие наглядное представление о реальной точности методик измерений в целом, т.е. МСИ являются формой проверки квалификации (ПК). МСИ по минералогическим методам исследования с 2016 года проводятся ежегодно во ФГБУ «ВИМС», который является единственным в нашей стране провайдером ПК-МСИ по оценке компетентности исследовательских лабораторий (ИЛ) в части проведения испытаний минерального сырья природного и техногенного происхождения минералогическими методами анализа [2]. В настоящее время проведено девять МСИ, в том числе по рентгенографическому количественному фазовому анализу – 5, оптико-петрографическому анализу – 2, по оптико-геометрическому и оптико-минералогическому анализу – по одному. В ПК-МСИ принимают участие ИЛ организаций различной ведомственной принадлежности, имеющие разные приборную и методическую базы. Количество участников МСИ по минералогическим методам анализа варьирует от 7 до 12.

Например, МСИ по оптико-минералогическому анализу – традиционному минералогическому методу, широко используемому при анализе шлиховых и дробленых проб различного сырья, показало соотношение результатов анализов образца контроля, представленного кварцем, кальцитом, пиритом и галенитом, признанных удовлетворительными, сомнительными и неудовлетворительными – 90 : 5 : 5. В целом проведенные межлабораторные сличительные испытания подтвердили статус, востребованность и количественного минералогического анализа и обоснованность его использования на разных стадиях и этапах геологоразведочных работ.

Важным моментом комплексной оценки твердых полезных ископаемых является междисциплинарный характер исследований. Сложность минеральных объектов определяет необходимость одновременного или последовательного использования методов анализа, заимствованных из различных областей знаний, и адаптированных к решению минералого-технологических, минералого-экологических, эколого-технологических задач. Следует отметить, что в практике минералогического сопровождения геологоразведочных и, в частности, технологических работ стремительно прогрессируют IT-технологии, являющиеся основой инновационных решений проблем комплексного освоения минерального сырья [6].

В заключение следует отметить, что сегодня остро ощущается недостаток кадров минералогических специальностей, связанный с сокращением (или закрытием) профильных кафедр в ВУЗах страны. Нередко минералогические исследования проводят специалисты с базовым образованием в смежных областях (обогатители, физики, химики, биологи и др.), что, естественно, сказывается на качестве результатов. Поэтому приветствуются все формы обучения: от индивидуальных стажировок по методам минералогического анализа до ознакомительных и специальных лекций, практических занятий по актуальным направлениям и современным методам прикладной минералогии.

Работа выполнена в рамках темы «Развитие минерально-сырьевого комплекса Тимано-Североуральско-Баренцевоморского региона на основе эффективного прогноза, геологического моделирования, геолого-экономической оценки ресурсного потенциала и новых технологий переработки полезных ископаемых» (ЕГИСУ НИОКТР – 1021051101666-2-1.5.1; FUUU-2022-0059).

ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 170–176.

2. Ожогина Е. Г., Лебедева М. И., Горбатова Е. А. Межлабораторные сравнительные испытания в минералогических работах // Стандартные образцы. 2017. Т. 13. № 2. С. 37–47.

3. Ревнивцев В. И., Доливо-Добровольская Г. И., Владимиров П. С. Технологическая минералогия обломочных малых частиц. СПб.: Наука, 1982. 248 с.

4. Ozhogina E. G., Kotova O. B. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (2-s2.0-85059377649). 2019. P. 32–40.

5. Пирогов Б. И., Ожогина Е. Г. Принципы и методы технологической минералогии при переработке твердых полезных ископаемых // Вестник геонаук. 2020. 2 (302). С. 11–15.

6. Понарядов А. В., Котова О. Б., Шиенг Сан. Фотокаталитический нанореактор на основе низкоразмерных структур оксидов титана // Вестник геонаук. 2022. 1 (325). С. 54–56.

DOI: 10.17076/TM15_50

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ И СТАТИСТИКИ МЕЖЗЕРНОВЫХ КОНТАКТОВ

Войтеховский Ю. Л.

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург

В науках о минеральном веществе – кристаллографии, минералогии и петрографии – принят конституционный принцип: объект определяется составом (химическим, минеральным) и строением (структурой, текстурой). Для определения составов есть точные методы количественного (химического, модального) анализа, структур минералов – кристаллографическая теория и рентгеновские методы. В описаниях минеральных агрегатов и горных пород фундаментальной математики нет. Но их структурам и текстурам посвящены монографии и атласы [1, 16], поскольку «каждая горная порода имеет структуру и текстуру» [13, 15], и потому, что они говорят о генезисе. Первая статья Г. К. Сорби, применившего микроскоп к анализу прозрачных шлифов, называлась «О микроскопической структуре кристаллов, указывающей на происхождение минералов и горных пород» [29].[1]

Ю. И. Половинкина взяла эпиграфом к монографии слова Е. С. Федорова: «Для определения породы важнейшими моментами являются структура и минеральный состав, и притом из этих двух моментов первый является наиболее важным» (1896). Вот похожие мысли: «Сложение и некоторые другие особенности пород имеют никак не меньшее значение, чем минералогический состав» [17, с. 88], при этом «изучение минералогического состава гораздо существеннее изучения чисто химического» [17, с. 157]. Важно указать на подоплеку бытующих определений петрографических структур и текстур. Представим себе «плеохроичный дворик» вокруг радиоактивного минерала. В той или иной степени в нем нарушена структура ойкокристалла. Там, где она разрушена совсем, некая организация вещества есть, но структуры нет. Этот объем – за границами кристаллографии, здесь ее терминология не применима.

Теперь представим себе «гнейсы, пронизанные жилами аплита или гранита, в которых эти жилы обнаруживают сильную складчатость;

[1] Позднее он вспоминал: «In those early days people laughed at me. They quoted Saussure who had said that it was not a proper thing to examine mountains with microscopes, and ridiculed my action in every way. Most luckily I took no notice of them», то есть «Поначалу люди смеялись надо мной. Они цитировали Соссюра, который сказал, что не подобает рассматривать горы в микроскопы, и всячески высмеивали мои действия. К счастью, я не обращал на них внимания» (пер. авт.). Замечательный пример эволюции идеи от полного неприятия до всеобщего признания. Отсюда вывод: надо быть смелее в новых методах…

образование складок произошло еще до кристаллизации гранита, при чем вмещающая порода в непосредственном соседстве была чрезвычайно пластична» [13, с. 322]. По Я. Й. Седерхольму мы назовем их птигматитами (греч. птигма – складка). «Конгломерат, богатый кристаллическим цементом» [там же], назовем пуддингом, ибо его напоминает. «Афанитовая с дендритоподобными удлиненными микролитами оливина и пироксена или одного из этих минералов, находящихся в сложных блоковых срастаниях» [15, с. 411] – это структура спинифекс, ибо напомнила авторам одноименную австралийскую и южно-африканскую траву [30]. Отдадим должное языку петрографов, достойному систем К. Линнея и Э. Геккеля. Наша методическая претензия состоит в другом: нельзя называть структурой то, что по сути бесструктурно. Смешав их во всем природном многообразии, затем в попытке их различить останется прибегнуть к метафорическому богатству языка, что и случилось…

Е. С. Федоров заметил: «Общее стремление всех наук суживать понятие принимаемых ими единиц дает себя чувствовать и в петрографии; но здесь, быть может, слабее, чем в какой-нибудь другой науке, единицы эти удается подвести под сколько-нибудь строгие определения. Главной причиной трудности является то обстоятельство, что сама единица петрографии – горная порода – есть нечто сложное; она сама состоит из подчиненных единиц – минералов, и связь их между собою в горной породе есть связь механическая» [17, с. 87]. Ему не удалось построить математическую теорию кристаллической горной породы, скорее всего потому, что в математике своего времени он не видел нужной логической конструкции, а концепции кристаллографии его не устроили. В современной математике подходящей представляется концепция дискретного топологического пространства с дальнейшей детализацией в пространство толерантное, измеримое, метрическое, коррелированное и т. д. [3 и мн. др.]. Далее укажем лишь тот логический ход, который ведет к определению петрографической структуры.

К определению петрографической структуры

Из системного анализа заимствуем представления об организации и структуре. Организация – совокупность всех отношений между частями целого. Структура – совокупность самых важных отношений, определяющих целое по сути. Организацию горной породы выразим суммой вероятностей бинарных (еще есть тернарные и куотернарные, но это – более высокие этажи теории) межзерновых контактов:

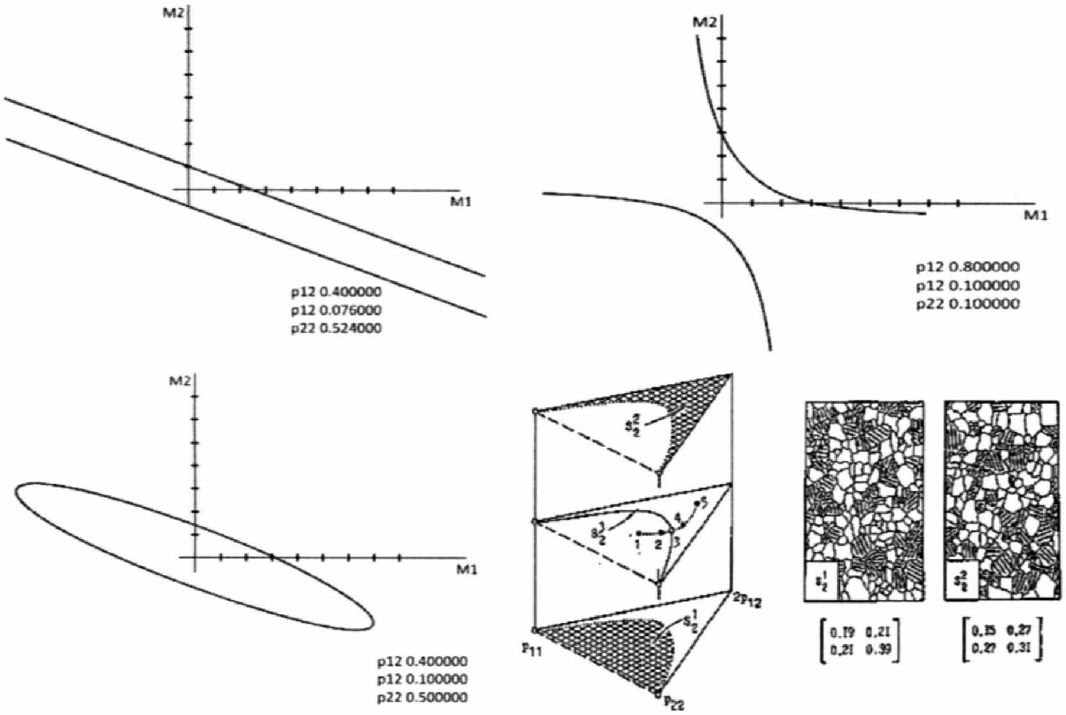
$$\sum_{i,j=1}^{n} p_{ij}\, m_i\, m_j = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & \cdots & m_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \cdots \\ m_n \end{bmatrix}$$

Формализм показывает, что любая горная порода представляет собой многозначный автоморфизм (замыкание, отображение на себя) набора минералов, управляемый оператором P_{ij} вероятностей межзерновых контактов:

$$\sum_{i,j=1}^{n} p_{ij}\, m_i\, m_j = \{m_i\}_1^n \xrightarrow{\mathrm{P}ij} \{m_i\}_1^n$$

Оператор P_{ij} – симметрическая матрица коэффициентов квадратичной формы от n переменных (минералов в горной породе). Отвечающую ей поверхность назовём структурной индикатрисой. Ее тип строго определяется канонической диагональной формой матрицы P_{ij}. Петрографическая структура – инвариант горной породы, (алгебраически) фиксируемый диагональной формой матрицы P_{ij} и (геометрически) структурной индикатрисой. Классификация n-минеральных петрографических структур сведена к таковой n-мерных квадратичных поверхностей [6]. Согласованная номенклатура проста: символ $S_{\mathbf{n}}^{\mathbf{m}}$ означает, что в диагональной форме матрицы P_{ij} n-минеральной структуры ровно m (1 … n) положительных чисел.

В барицентрической диаграмме на рисунке показан переход от норита 1 (индикатриса – эллипс) к нориту 5 (индикатриса – гипербола). Граница между их структурами – условие $p_{11}\, p_{22} = p_{12}^2$ в точке 3 (индикатриса – пара параллельных прямых, т. н. равновесие Харди-Вайнберга). Переход состоит в повороте и удлинении эллипса, его разрыве в бесконечно удалённой точке, изгибании пары прямых в гиперболу и её деформации. Изменения в вероятностях p_{ij} в петрографических шлифах неуловимы, что и сформировало мнение, будто между горными породами с разной организацией всегда есть непрерывные переходы [23]. Всякая петрографическая структура устойчива относительно некоторых вариаций вероятностей p_{ij}. Но это не противоречит ее изменению скачком на границах классификации.



Биминеральные структуры на примере норитов Фёдорово-Панских тундр, Кольский п-ов

О наблюдениях в петрографических шлифах

Проблема, которую доставил нам Г. К. Сорби с удовольствием изучать яркие петрографические шлифы – стереологические реконструкции, т.е. восстановления любого параметра в 3D по меркам, снятым в 2D (площадной метод Делесса), 1D (линейный метод Розиваля) и даже 0D (точечный метод Глаголева модального анализа). Статистические распределения тех и других связаны сложным образом. Укажем лишь на интегральные уравнения Вольтерра 2-го рода как математическую теорию, имеющую к теме прямое отношение. Есть надежда (требующая изучения), что реконструкция истинных вероятностей p_{ij} по их 2D значениям проще, чем для площадей сечений минеральных зерен или секущих их хорд хотя бы в части точности. Очевидно, применение метода в массовом порядке возможно только при наличии программного обеспечения для автоматических оптических анализаторов структур. Литература по стереологическим реконструкциям [2, 4, 5, 7–12, 18–21, 26, 27, 32, 33] и истории измерений под микроскопом [22, 24, 25, 28, 31] обширна.

Проблема стереологической реконструкции не только техническая. Приятно сознавать, что в ней есть философская подоплека. «На свете есть многое, из чего нам дано ровно столько, сколько необходимо, чтобы мы догадались: это, по сути, надёжно укрыто от наших глаз. Чтобы это понять, не надо прибегать к каким-то высоким абстракциям. Всё, чему свойственна глубина, имеет единую основу. Так, материальные предметы, которые мы можем явственно наблюдать, осязать, обладают третьим измерением, иначе говоря, глубиной, неким внутренним пространством. Но как раз это третье измерение – и невидимо, и неосязаемо. Конечно, на поверхности подобных предметов мы можем распознать кое-какие слабые, робкие намёки на то, что находится внутри, но это «внутри» никогда не сможет выбраться наружу, стать явным точно в такой же мере, как чисто внешние стороны предметов. Напрасный труд – пытаться нарезать третье измерение на тонкие слои поверхностей. Как бы тонко мы ни резали – слои всегда будут сохранять некоторую толщину, иначе говоря, глубину, невидимое, неосязаемое внутреннее пространство. Если же мы получим абсолютно прозрачные для взгляда – мы просто-напросто вообще перестанем видеть что бы то ни было и не заметим ни глубины, ни поверхности. Перед нами предстанет прозрачность как таковая, или ничто. Ибо если глубина нуждается в поверхности, за которой можно было бы укрыться, спрятаться, то и поверхность, в свою очередь, также нуждается в глубине, чтобы можно было над чем-либо простираться, что-либо собой прикрывать» [14].

Выводы

1. Петрография и технологическая минералогия нуждаются в корректном определении категории петрографической структуры, первая потому, что это – ее фундаментальная характеристика, вторая – чтобы в полной мере вовлечь ее в процедуры прогноза свойств горных пород и руд.

2. Теория петрографических структур должна использовать межзерновые контакты как фундаментальное отношение в горных породах и рудах и математическую статистику как адекватный метод описания.

3. В предложенном автором варианте организация горных пород и руд – многозначный естественный автоморфизм некоторого ансамбля минеральных видов, реализованный через контактирование минеральных индивидов.

4. Петрографическая структура – инвариант горной породы, определяемый через каноническую диагональную форму симметрической матрицы вероятностей межзерновых контактов и соответствующую структурную индикатрису.

5. Классификация n-минеральных петрографических структур сведена к таковой n-мерных квадратичных поверхностей. Согласованная номенклатура: символ S_n^m означает, что в диагональной форме матрицы P_{ij} n-минеральной структуры ровно m (1 … n) положительных чисел.

6. Для массового применения метода нужно программное обеспечение оптических анализаторов структур и исследование проблемы стереологической реконструкции для вероятностей p_{ij}, подсчитанных в петрографических шлифах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетехтин А.Г., Генкин А.Д., Филимонова А.А., Шадлун Т.Н. Текстуры и структуры руд. М.: Госгеолтехиздат, 1958. 435 с.

2. Войтеховский Ю.Л. Стереологический подход в модальном анализе горной породы: распределения сферических частиц // Тр. X Всерос. конф. «Матем. исслед. в естеств. науках». Апатиты: K & M, 2014. С. 78–99.

3. Войтеховский Ю. Л. Минеральный агрегат: к истории определения понятия // Зап. РМО. 2022. № 6. С. 101–120.

4. Войтеховский Ю.Л., Солодов Ю.Л. Стереологический подход в модальном анализе горной породы. Исследование распределений изометричных частиц. Деп. ВИНИТИ 20.07.89. № 4793-В89. 38 с.

5. Вульфсон Н.И. Методы стереологии в геофизике. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 199 с.

6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

7. Глаголев А.А. Количественный минералогический анализ горных пород под микроскопом. Л.: Госгеолтехиздат, 1932. 25 с.

8. Глаголев А.А. О геометрических методах количественного минералогического анализа горных пород. М.-Л.: Госгеолиздат, 1933. 47 с.

9. Глаголев А.А. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. М.-Л.: Госгеолиздат, 1941. 263 с.

10. Журавский А.М. Минералогический анализ шлифа с точки зрения вероятностей. М.-Л.: Госгеолиздат, 1932. 20 с.

11. Иванов Н.В. Новое направление в опробовании рудных месторождений. М.: Госгеолиздат, 1963. 179 с.

12. Иванов О.П., Ермаков С.Ф., Кузнецова В.Н. Повышение точности определения весового гранулометрического состава рудных минералов по измерениям в шлифах // Тр. ЦНИИ олово. Новосибирск: Наука, 1979. С. 10–14.

13. Левинсон-Лессинг Ф. Ю. (Ред.) Петрографический словарь. Л.-М.: Госгеолиздат, 1932. 472 с.

14. Ортега-и-Гассет Х. Глубь и поверхность // Размышления о Дон Кихоте. М.: Грюндриссе, 2016. С. 59–61.

15. Петров В. П. (Ред.) Петрографический словарь. М.: Недра, 1981. 496 с.

16. Половинкина Ю.И. Структуры и текстуры изверженных и метаморфических пород. Ч. 1. Словарь терминов. 235 с.; ч. 2, т. 1. Изверженные породы. 424 с.; ч. 2, т. 2. Метаморфические породы. 272 с. М.: Недра, 1966.

17. Федоров Е.С. Основания петрографии. СПб.: Тип. П.П. Сойкина, 1897. 236 с.

18. Чейз Ф. Количественно-минералогический анализ шлифов под микроскопом. М.: Иностр. лит., 1963. 156 с.

19. Шванов В.Н. Песчаные породы и методы их изучения. Л.: Недра, 1969. 248 с.

20. Шванов В. Н., Марков А. Б. Гранулометрический анализ песчаников в шлифах // Геол. и разведка. 1960. № 12. С. 49–55.

21. Delesse M. Procede mecanique pour determiner la composition des roches // Annales des mines. De memoires sur l'exploitation des mines. Quatrieme serie. T. 13. Paris: Carilian-Goeury et Dalmont, 1848. P. 379–388. Перевод: Тр. X Всерос. конф. «Матем. исслед. в естеств. науках». Апатиты: K & M, 2014. С. 101–106.

22. Dollar A.T. J. An integrating micrometer for the geometrical analysis of rocks // Mineral. Mag. 1937. Vol. 24. P. 577–594.

23. Harker A. Petrology for students. Cambridge: University Press, 1908. 336 p.

24. Hunt W. F. An improved Wentworth recording micrometer // Amer. Miner. 1924. Vol. 9. P. 190–193.

25. Hurlbut C. S., Jr. An electric counter for thin-section analysis // Amer. J. Sci. 1939. Vol. 237. P. 253–261. Перевод: Тр. X Всерос. конф. «Матем. исслед. в естеств. науках». Апатиты: K & M, 2014. С. 116–120.

26. Krumbein W. C. Thin-section mechanical analysis of indurated sediments // J. Geol. 1935. Vol. 43. P. 482–496.

27. Rosiwal A. Über geometrische Gesteinanalysen. Ein einfacher Weg zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter Gesteine // Verh. der k.-k. Geol. Reichsanstalt. Wien: Verlag der k.-k. Geol. Reichsanstalt, 1898. S. 143–175. Перевод: Тр. X Всерос. конф. «Матем. исслед. в естеств. науках». Апатиты: K & M, 2014. С. 107–115.

28. Shand S. J. A recording micrometer for geometrical rock analysis // J. Geol. 1916. Vol. 24. P. 394–404.

29. Sorby H. C. On the microscopical structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks // Quarterly J. Geol. Soc. 1858. Vol. 14. P. 453–500.

30. Viljoen R. P., Viljoen M. J. The geology and geochemistry of the Lower Ultramafic Unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks // Proc. Geol. Soc. South Africa. 1969. N 2. P. 55–85.

31. Wentworth C. K. An improved recording micrometer for rock analysis // J. Geol. 1923. Vol. 31. P. 228–232.

32. Wicksel S. D. The corpuscle problem. A mathematical study of a biometric problem // Biometrica. 1925. Vol. 17. P. 84–99.

33. Wicksel S. D. The corpuscle problem. 2nd memoir. Case of ellipsoidal corpuscles // Biometrica. 1926. Vol. 18. P. 151–172.

DOI: 10.17076/TM15_51

УЛЬТРАОСНОВНЫЕ И ОСНОВНЫЕ ПОРОДЫ БУРЯТИИ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Кислов Е. В.[1], Худякова Л. И.[2], Малышев А. В.[1], Гаркушева Н. М.[2]

[1] Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ
[2] Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ

В настоящее время в условиях экологических и экономических ограничений пристальное внимание уделяется развитию минерально-сырьевой базы нашей страны, в частности, комплексному использованию минерального сырья. Многие виды остродефицитного и высоколиквидного сырья (Cu, Ni, ЭПГ, Au, Cr, Ti, алмазы, асбест, слюды, камнесамоцветное сырье) образуют месторождения в ультрамафит-мафитовых комплексах. Ультраосновные и основные породы нередко залегают в районе месторождений других полезных ископаемых. Их массивы зачастую расположены в экономически освоенных районах и имеют огромные запасы. Но ультраосновные и основные породы используются в лучшем случае как щебень. Вместе с тем, эти породы – перспективное сырье для получения многих видов материалов (удобрений, сорбентов). Но наиболее целесообразно и экономически выгодно их использование в отраслях строительной индустрии. Рассмотрим вопросы комплексного использования ультраосновных и основных пород на примере дунитов Йоко-Довыренского плутона и габбро интрузивов Метешихинский и Острая сопка.

Йоко-Довыренский массив входит в состав Северо-Байкальской ЭПГ-Cu-Ni провинции. Она расположена в юго-восточной части складчатого обрамления Сибирской платформы. В Северо-Байкальском районе Бурятии находятся рифейские ультрамафит-мафитовые массивы с ЭПГ-Cu-Ni оруденением: в пределах западной части Байкало-Муйской островной дуги Чайский, Гасан-Дякитский и Нюрундуканский синколизионные массивы, а в осевой части Сыннырской рифтогенной структуры – Йоко-Довыренский и Авкитский рифтогенные интрузивы [3, 7].

Йоко-Довыренский дунит-троктолит-габбровый массив (Байкальское месторождение) находится в 60 км к северу от оз. Байкал. Базиты и ультрабазиты водораздела рр. Тыя и Ондоко описал М. М. Тетяев в 1915 г. Сведения об их никеленосности получены А. С. Кульчицким в 1949 г. В 1959 г. Ф. К. Чинакаев обнаружил жилы Cu-Ni руд в северо-восточном контакте. Поисково-разведочные работы проведены в 1960–1963 гг. Л. М. Бабуриным. Прогнозные ресурсы пересчитаны А. Г. Степиным в 1989–1993 гг.: Ni – 147 тыс. т, Cu – 51.01 тыс. т, Co – 9.47 тыс. т.

Линзовидное тело размером 26×3.5 км субсогласно залегает в карбонатно-терригенных отложениях. Краевая зона и отходящие от нее силлы сложены плагиолерцолитами. Выше зоны: ультрамафитовая (дуниты, в нижней части плагиоклазсодержащие, в верхней – с обособлениями верлитов, диопсидитов и хромититов); ритмичного чередования плагиодунитов и троктолитов; троктолитов и оливиновых габбро; массивных оливиновых габбро; оливиновых габброноритов. Габбронориты слагают тела дополнительного внедрения в подошву и кровлю массива. Ультрамафитовая зона сложена почти полностью свежим дунитом мощностью до 1 км и протяженностью до 10 км. По ее нижней части проходит дорога для автомобилей повышенной проходимости.

Намеченный на 2007 г. аукцион на право геологического изучения (поиски, разведка) и добычу на участке «Довырен» был отменен, поскольку по нему прошла граница Центральной экологической зоны Байкальской природной территории. Но наиболее богатый уч. Озерный находится за ее пределами в бассейне р. Лена, что оставляет возможность освоения месторождения. Байкальское месторождение и сам Йоко-Довыренский массив изучены недостаточно. Открытая в 1960-х годах зона Cu-Ni оруденения протяженностью около 20 км исследована фрагментарно на нескольких рудопроявлениях с поверхности и на глубину 200–750 м редкими скважинами. Геофизические данные позволяют прогнозировать продолжение интрузива на глубину и северо-западном направлении, наличие в глубинных ультрамафитах богатых сульфидных руд [4, 6]. Чайское Cu-Ni месторождение и наиболее богатый участок Озерный Байкальского месторождения находятся вне пределов Байкальской природной области на расстоянии 30 км друг от друга в районе Холоднинского Pb-Zn месторождения между Байкало-Амурской железнодорожной магистралью и Калюмным K-Al, Нюрундинским Au-рудным месторождениями. К этим месторождениям планируется построить железную дорогу. Территория между Чайским и Байкальским месторождениями залицензирована для поиска новых Cu-Ni объектов. Все это делает актуальным попутное использование магнезиально-силикатных пород для строительных целей.

В бассейне нижнего течения реки Селенги известен ряд позднепротерозойских интрузивов. Несколько ультрамафит-мафитовых интрузивов, наиболее крупные из которых Метешихинский, Оймурский, Острая Сопка, объединяются в «метешихинскую группу» икатского комплекса. Они были закартированы в процессе геолого-съемочных работ Г. М. Яценко и Р. А. Назаревичем [8], включившим их в атарханский раннепалеозойский комплекс. Э. Л. Прудовский [5] при проведении тематических исследований отнес их в верхнепротерозойский довыренский базит-гипербазитовый комплекс. Позднее в этом районе проводились тематические работы, которые включали и прогнозную оценку на рудную Ti-Mt и Ni-Cu специализацию [2].

Метешихинский массив расположен в правобережье р. Селенга, ниже устья р. Итанца в междуречье рр. Метешиха и Большая, примерно в 80 км от оз. Байкал и г. Улан-Удэ. Массив вытянут в северо-восточном направлении на 8 км при максимальной ширине 2.5 км. Вмещающие породы – эффузивы, сланцы, метапесчаники, известняки, амфиболиты и кварциты селенгинской серии [1]. Прорывают различные граниты.

Внутреннее строение сложное, на 80 % состоит из разнообразных габброидов. В центральной части развиты в основном оливиновые габбро и габбронориты с мелкими телами дунитов, перидотитов, амфиболовых перидотитов и пироксенитов, к контактам они сменяются амфиболовыми и амфиболизированными габбро, а непосредственно на контактах с гранитами отмечаются почти нацело амфиболизированные габбро. В юго-западной части массива меланократовые разности габбро сменяются на более мезократовые, которые зачастую переходят в лейкократовые и вновь сменяются на меланократовые. Здесь наблюдается перемежаемость маломощных (1–30 см) жилообразных обособлении пироксенитов (горнблендитов) с мелано- и мезократовыми габбро. Выше к водоразделу наблюдается перемежаемость габброидов с перидотитами. Кроме того, ультраосновные породы наиболее развиты в северо-западной части массива: здесь распространены прослои плагиолерцолитов постепенно переходящие в пироксениты. По простиранию массива от юго-западного фланга на северо-восток доля ультраосновных пород постепенно падает, а среди габбро начинают преобладать мезо- и лейкократовые разности и габбронориты. Иногда в габброидах выделяются участки неоднородного такситового строения, а также пегматоидного облика. Контакты между основными и ультраосновными породами постепенные, что свидетельствует о принадлежности их к единой дифференцированной серии интрузива.

Массив Острая Сопка образует вытянутое в субширотном направлении тело площадью около 3 км^2 в районе г. Острая Сопка хребта Черная грива. Массив в плане имеет серповидную форму. Западный и восточный контакты тектонические. На севере массив прорывают верхнепротерозойские (?) гнейсы и амфиболиты, в остальных местах интрузив прорывается верхнепротерозойскими гранодиоритами, гнейсо- и плагиогранитами баргузинского комплекса. Первой фазе соответствуют амфиболовые перидотиты, плагиоперидотиты, лерцолиты, гарцбургиты и пироксениты. Вторая фаза сложена габбро и габбро-норитами. На контакте фаз развиты такситовые пироксениты. Преобладают габброиды, составляющие порядка 70% площади массива. В центральной части плутона развиты ультрамафиты, слагающие тела до 400 м в поперечнике, а также окружающие их пироксениты, оливиновые габбро и габбро-нориты, затем следует зона мощностью порядка 300 м амфиболовых габбро, сменяющихся к контакту амфиболизированными и циозитизированными габброидами. Дайковая серия представлена оливиновыми долеритами и пегматоидными амфиболовыми габбро.

Таким образом, Йоко-Довыренский массив несет высоколиквидную минерализацию и находится в развивающемся горнорудном районе. Интрузивы Метешихинский и Острая сопка расположены в обжитом и экономически развитом районе между Улан-Удэнской агломерацией и Тимлюйским цементным заводом в п. Каменск Кабанского района. У подножия Метешихи проходит асфальтированная автомобильная дорога Турунтаево – Острог – Покровка – Шергино.

Определены качественные показатели пород и направления их использования. Работы проводились в соответствии с требованиями технической документации: ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия»; ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия». Породы были изроблены в щебень.

Исследованный щебень имеет высокое качество, не содержит зерен слабых пород и глины в комках, а также устойчив против всех видов распада. Форма зерен щебня у дунитов кубовидная, у габбро наблюдается присутствие незначительного количества зерен пластинчатой и игловой формы. На основании полученных данных и требований технической документации установлено, что щебень из изученных пород ультраосновного и основного состава можно использовать для производства тяжелых бетонов, асфальтобетонных смесей, ведения дорожных и других строительных работ.

Кроме того, эти породы могут найти применение в керамической промышленности. Один из широко распространенных материалов, применяемых в промышленном и гражданском строительстве – кирпич керамический. Его производство материалоемкое и энергозатратное. Кроме того, наблюдается дефицит высококачественных глин, что требует изменения технологических режимов его получения. Решение этой задачи возможно за счет использования новых видов сырьевых материалов, способных заменить глину в процессе формования изделий. Поэтому, использование ультраосновных и основных пород в керамическом производстве перспективно и актуально.

При проведении исследований пробы пород истирали в стержневом вибрационном измельчителе типа 75Т-ДрМ в течение 5 минут и использовали в качестве минеральной добавки, позволяющей заменить глинистое сырье. Был выполнен ситовой анализ и определен гранулометрический состав сырьевых материалов, включая глину Оймурского месторождения. Наиболее крупные фракции измельченной породы наблюдаются у габбро Метешихинского массива – частицы размером более 0.315 мм составляют 85.5%. Далее следует габбро интрузива Острая Сопка с 77.7%. У дунита соответствующий показатель находится в пределах 63.3%. Самые мелкие частицы имеет глина, где содержание фракций менее 0.315 мм составляет 51.1%.

Для установления влияния вида добавки, ее количества и температуры обжига на механическую прочность керамики готовили образцы – кубы с размером ребра 20 мм. После сушки образцы обжигали в лабораторной муфельной печи с изотермической выдержкой 3 часа при различных температурах. Образцы охлаждались естественным образом после отключения печи. Количество вводимой в смесь с глиной минеральной добавки варьировали от 10 до 50%. Температура обжига изменялась от 950 °С до 1100 °С.

С повышением температуры обжига механическая прочность образцов увеличивается. Обожженные образцы с добавкой дунита имеют прочность выше обожженной глины без добавки на всем промежутке обжига, а с добавкой габбро

превышение соответствующего показателя наступает после 1050 °С. Наибольшие показатели имеют образцы с минеральной добавкой, обожженные при температуре 1100 °С.

Наибольшую прочность имеют образцы с содержанием минеральной добавки 10%. Дальнейшее увеличение добавки приводит к снижению механических показателей образцов. Наилучшие значения получены при введении в состав глины габбро, худшие – дунита. С увеличением количества минеральной добавки габбро прочностные показатели образцов снижаются ступенчато, ультраосновного состава – практически линейно. Тем не менее, прочность образцов с долей минеральной добавки до 50%, полученных при всех температурах обжига, удовлетворяют требованиям технической документации.

Физико-механические показатели образцов керамики, полученных пластическим способом формования из 70% глины и 30% породы, обожженных при температуре 1100 °С, соответствуют требованиями ГОСТ 530-2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия» (табл.).

Физико-механические показатели образцов керамики с добавкой горных пород

Показатели	ГОСТ 530-2012	Керамика с добавкой		
		дунита Йоко-Довырен	габбро Метешиха	габбро Острая сопка
Водопоглощение, %	не менее 6	9.5	9.7	10.2
Предел прочности при сжатии, МПа	не менее 2.5	40.8	67	50.6
Морозостойкость, цикл	не менее 25	150	150	150
Средняя плотность, кг/м^3	не более 2400	2230	1990	2110

В целом, образцы керамики с добавкой основных и ультраосновных пород, полученные пластическим способом формования, имеют показатели прочности, водопоглощения и морозостойкости, удовлетворяющие требованиям технической документации, могут применяться для кладки и облицовки наружных и внутренних стен зданий и сооружений, а также для кладки фундамента из полнотелого кирпича.

Таким образом, проведенные исследования показали, что ультраосновные и основные породы – перспективное сырье для получения различных видов строительных материалов. Массивы этих пород находятся в выгодной экономико-географической ситуации. Щебень из таких пород имеет высокое качество и может использоваться для получения бетонов и асфальтобетонов повышенной прочности и долговечности. Использование ультраосновных и основных пород в качестве минеральной добавки позволит получать керамический кирпич, не уступающий по своим характеристикам традиционным аналогам.

Исследование проведено в рамках государственных заданий ГИН СО РАН АААА-А21-121011890029-4 и БИП СО РАН АААА-А21-121011890003-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудинин М. И., Беличенко В. Г., Гилев А. Ю., Бараш И. Г. Ультрабазит-базитовые комплексы района нижнего течения р. Селенги (Юго-Восточное Прибайкалье) // Доклады академии наук. 1999. Т. 366, № 1. С. 84–87.

2. Дарижапов А. Д., Петров Н. Я., Крылов Б. В. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые ю.-з. части Морского хребта. Листы № 48-119-Г; 130-Г, 131-А, Б, В и Г; 142-Б; 143-А. Отчет Прибрежной ПСП за 1981–83 гг. Улан-Удэ, 1984.

3. Кислов Е. В. Северо-Байкальская платинометалльно-медь-никеленосная провинция: геодинамика, петрология, рудообразование // Металлогения древних и современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике. Миасс: ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2023. С. 40–44.

4. Нефедьев М. А. Моделирование и оценка перспектив Северо-Байкальского рудного района по геофизическим данным (Северное Прибайкалье). Новосибирск: Из-во «Гео», 2011. 208 с.

5. Прудовский Э. Л. Геологическое строение и никеленосность Метешихинской группы массивов гипербазит-базитовых пород, Южное Прибайкалье. Отчет о работах Оймурского поисково-ревизионного отряда за 1966 г. Улан-Удэ, 1967. 171 с.

6. Турутанов Е.Х., Степаненко А.В., Буянтогтох Б. Объемная модель Йоко-Довыренского габбро-перидотитового массива (Северное Прибайкалье) по гравиметрическим данным // Вестник ИрГТУ. 2013. № 2. С. 88–95.

7. Цыганков А. А. Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем докембрии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 306 с.

8. Яценко Г. М., Назарович Р. А. Геологическая карта СССР среднего масштаба. Серия Прибайкальская. Лист N-48-XXXVI. Объяснительная записка. Улан-Удэ, 1966. 70 с.

DOI: 10.17076/TM15_52

МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО УЛЬТРАМАФИТ-ЩЕЛОЧНО-КАРБОНАТИТОВОГО ИНТРУЗИВНОГО ТИКШЕОЗЕРСКО-ЕЛЕТЬОЗЕРСКОГО КОМПЛЕКСА (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ, РОССИЯ)

Щипцов В. В.[1, 2], Бубнова Т. П.[1, 2], Фролов П. В.[1]

[1] Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск
[2] Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

Данные о минеральном потенциале палеопротерозойского Тикшеозеро-Елетьозерского ультраосновного-щелочно-карбонатитового интрузивного комплекса, расположенного в Северной Карелии, получены в результате геолого-петрологических, минералого-геохимических, геохронологических и минерагенических исследований среднепалеопротерозойского магматизма данной территории [9, 10, 11, 12, 18, 26, 28]. Специфика рассматриваемого комплекса заключается в том, что этот комплекс принадлежит в возрастном отношении к наиболее древним образованиям мира. При оценке минерагенического потенциала выявляется данная специализация, например, относительная «стерильность» по отношению к редким металлам и РЗЭ.

Щелочные массивы и карбонатиты докембрия

Изучение щелочных магматических пород и карбонатитов началось в начале XX века. Карбонатиты были открыты и описаны W.C. Brogger [17] в массиве Фен (Норвегия), геологически связанном с Фенноскандинавским щитом. Это побудило исследователей начать геологическое изучение эндогенных горных пород на Кольском полуострове в России.

А.А. Кухаренко и др [4] опубликовали первый в России петрологический и минералого-геохимический обзор карельского и кольского щелочных комплексов пород. Обширные обзоры щелочных пород и карбонатитов Северной и Южной Америки, стран бывшего СССР приведены в работах [19, 30]. Россия занимает первое место в мире по распространенности щелочных пород и карбонатитов.

Особое место в мировой иерархии занимает массив Палабора в ЮАР [16]. Этот массив относится к возрастной группе палеопротерозойского комплекса карбонатитовых месторождений в ЮАР, расположен в северо-восточной части провинции Трансвааль, в 400 км к северо-востоку от Йоханнесбурга. Месторождение площадью более 28 км^2 сложено нижнеархейскими гранитными гнейсами, прорванными почти вертикальными штокверковыми телами апатитоносных пироксенитов, карбонатитов и щелочных пород. Для комплекса Палабора проведено комплексное определение U-Pb возраста по циркону и бадделеиту. Различные фазы были синхронно отложены в 2060 млн лет [32]. Комплекс имеет высокий исходный изотопный состав Sr и низкий исходный изотопный состав Nd и Hf. Первичная карбонатитовая магма образовалась из обогащенной мантии. Карбонатитовый магматизм Палабора был инициирован мантийным плюмом, связанным с событием формирования комплекса Бушвельд.

Вызванный в мире интерес к щелочным массивам и карбонатитам из-за их высокого экономического потенциала расширил представления об областях распространения щелочного магматизма. Щелочные породы были найдены на Йилгарнском кратоне Австралии [30], в кратонах Индии [20] и других докембрийских районах мира.

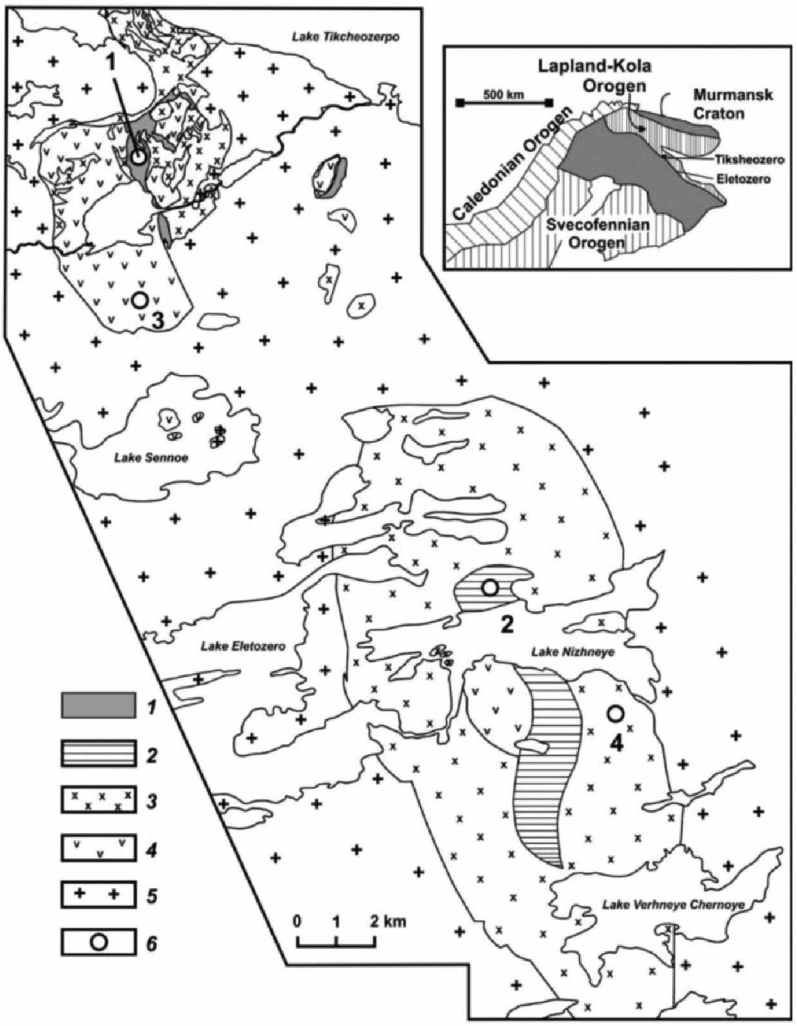


Рис. 1. Схема геологического строения Тикшеозеро-Елетозерского ультрабазит-щелочно-карбонатитового комплекса. Составлена В. В. Щипцовым и Н. И. Щипцовой с использованием материалов [1]

1 – карбонатиты; 2 – нефелин и щелочные сиениты; 3 – породы основного состава; 4 – породы ультраосновного состава; 5 – гранитоиды; 6 – месторождения: 1 – Карбонатитовое; 2 – оз. Нижнее; 3 – Шапкозерское; 4 – Суриваара

На территории Финляндии архейский интрузивный комплекс с апатитсодержащими карбонатитами был описан K. Puustinen [25] (карбонатитовый комплекс Siilinjärvi, Восточная Финляндия). На протяжении нескольких десятилетий на месторождении Siilinjärvi добываются апатитовые руды [24]. Их возраст 2.6 млрд лет [23].

В северной части Фенноскандинавскго щита известны среднепалеопротерозойские ультраосновно-щелочные и карбонатитовые интрузии (финская Лапландия – Latvajoki, Petaikko-Suvantovaara, Kortejarvi и Iivaara с возрастом около 1880–1800 млн лет [21; 22] и Кольский полуостров – докембрийские ультраосновные фоидолиты и карбонатиты в массиве Гремяха-Вырмес [14] и ультраосоновной массив р. Иоканга [5]), имеющие минерагеническое сходство с Елетьозерским и Тикшеозерским массивами [29] (рис. 1). Палеопротерзойские массивы многофазны и представляют собой смесь основных и щелочных мантийных магм [24].

Тикшеозерский ультрамафит-щелочно-карбонатитовый (~2000 Ма) [18] и Елетьозерский сиенит-габбровыый комплекс (2086 ± 30 Ма) [26] входят в состав среднепалеопротерозойской Ятулийско-Людиковийской крупной изверженной провинции в восточной части Фенноскандинавского щита [26].

Промышленные минералы Тишкшеозерско-Елетьозерского комплекса

История открытия объектов началась в первой половине XX века. Конкретные шаги по практической оценке промышленных минералов относятся к более позднему периоду – Елетьозерский массив [1, 2] и Тикшеозерский массив [3, 8].

Елетьозерский массив представляет собой концентрически зональное тело эллиптической формы с изгибной осевой линией. Он занимает площадь около 100 км^2, протянувшись на 18–20 км по длинной оси и на 6–8 км по короткой. Массив был открыт Ю. С. Неуструевым в 1936 году. В 1954–

1956 годах было осуществлено картирование, поиски и оценка титановых руд Суриваары [2]. Геология, петрография и рудный потенциал массива изучались исследователями Геологического отдела Карельского отделения Академии наук СССР в 1954–1959 годах. Результаты этих исследований представлены в монографии [1].

Тикшеозерский комплекс площадью около 24 км^2 сечет архейские гранитогнейсы и раннепалеопротерозойские граниты. В 1972 г. массивы пироксенитов на юго-западном берегу озера Тикшеозеро были изучены коллективом Института геологии КарНЦ АН СССР [8, 3], выявлен новый тип щелочного магматизма с ассоциацией оливинитов, тералитов и пород якупирангит-уртитовой серии, ранее неизвестный для докембрия Карелии. Геологами «Севзапгеологии» были обнаружены карбонатиты.

Титаномагнетитовые и ильменитовые руды

Титаномагнетитовый минеральный тип широко развит в сиенит-габбровых интрузивных комплексах Елетьозера, что является важным ресурсом Fe и Ti. Известно, что в настоящее время существует проблема происхождение такого типа. Одна группа исследователей связывает образование оксидных руд с осаждением плотного титаномагнетита в исходной феррогабброидной магме [15], другая – с ликвацией высокожелезистой жидкости при кристаллизации Fe-Ti-базальтовой магмы [33].

Титановые руды на Елетьозерском массиве отмечены на нескольких участках. В габброидах всего массива выделены два рудных поля – Западное и Восточное [1]. Рудные тела представлены вкрапленными и массивными рудами. Вкрапленные Fe-Ti оксидные руды образуют согласные с общей расслоенностью линзы и слои. Массивные руды развиты в подчиненном количестве; они образуют слои и линзы, а также секущие жилы. Наличие в Fe-Ti оксидах повышенных содержаний Nb и Ta позволяет рассматривать эти руды в качестве комплексных.

В рудном поле «Западное» выявлены существенно титаномагнетитовые в мелкозернистом и крупнозернистом габбро, ильменит-титаномагнетитовые в среднезернистом габбро (апатит-титаномагнетит-ильменитовые рудные проявления в комплексах серии ортоклаз-слюдистого габбро и слюдистого габбро-перидотита. Одним из таких участков является Кукаваара в северной оконечности Елетьозерского массива. Титаномагнетитовый минеральный тип руд связывается с сидеронитовыми клинопироксенитами. Здесь по данным ранних работ [2] определены содержания TiO_2 в клинопироксенитах от 3 до 8 %.

Рудное поле «Восточное» (Суриваара) Елетьозерского массива является наиболее перспективным. В 50-е годы здесь были обнаружены и опробованы несколько залежей с различной минерализацией, представленной титансодержащим магнетитом и ильменитом. Выделены 5 залежей – «Северная», «Западная», «Центральная», «Параллельная» и «Главная» (рис. 2).

Субмеридиональная залежь «Северная» представлена меланократовым оливиновым габбро, перидотитами и пироксенитами с крутым падением на запад, имеет мощность около 100 м. В висячем боку залежи установлены ильменит-титаномагнетитовые руды, в лежачем – титаномагнетит-ильменитовые. Основная часть запасов сосредоточена

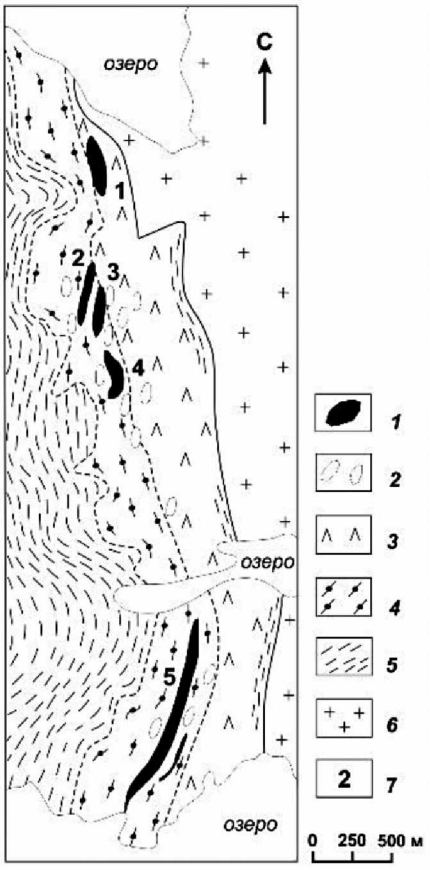


Рис. 2. Геологическая схема рудного поля Суриваара (по материалам [1])

1 – титаномагнетитовые и ильменитовые руды (руды оливиновых габбро, перидотиты, слюдистые перидотиты, амфиболиты); 2 – щелочные и нефелиновые сиенитовые пегматиты; 3 – слюдяные габбро, слюдяные перидотиты; 4 – крупнозернистые габбро; 5 – ортоклазовые лейкократовые габбро, средне- и мелкозернистые габбро; 6 – гранодиориты; 7 – рудные залежи: 1 – Северная; 2 – Западная; 3 – Центральная; 4 – Параллельная; 5 – Главная

в залежи «Главная». Она сложена рудными оливиновыми крупнозернистыми и мелкозернистыми габбро, перидотитами и пироксенитами. Рудная залежь имеет падение на северо-запад под углами 40–75°. Максимальная рудоносность приурочена к лежачему боку и представлена титаномагнетит-ильменитовым типом.

По содержанию диоксида титана руды подразделяются на три сорта: 1 сорт – выше 12% TiO_2; 2 сорт – 8–12% TiO_2; 3 сорт – 5–8% TiO_2. Химический и минеральный состав этих руд охарактеризован в более ранней работе [12]. По минеральному составу рудные минералы представлены магнетитом, титаномагнетитом и ильменитом. Из других минералов главными являются полевой шпат, оливин, амфибол. Особенности ильменитовых руд месторождения Суриваара показаны на рисунке 3.

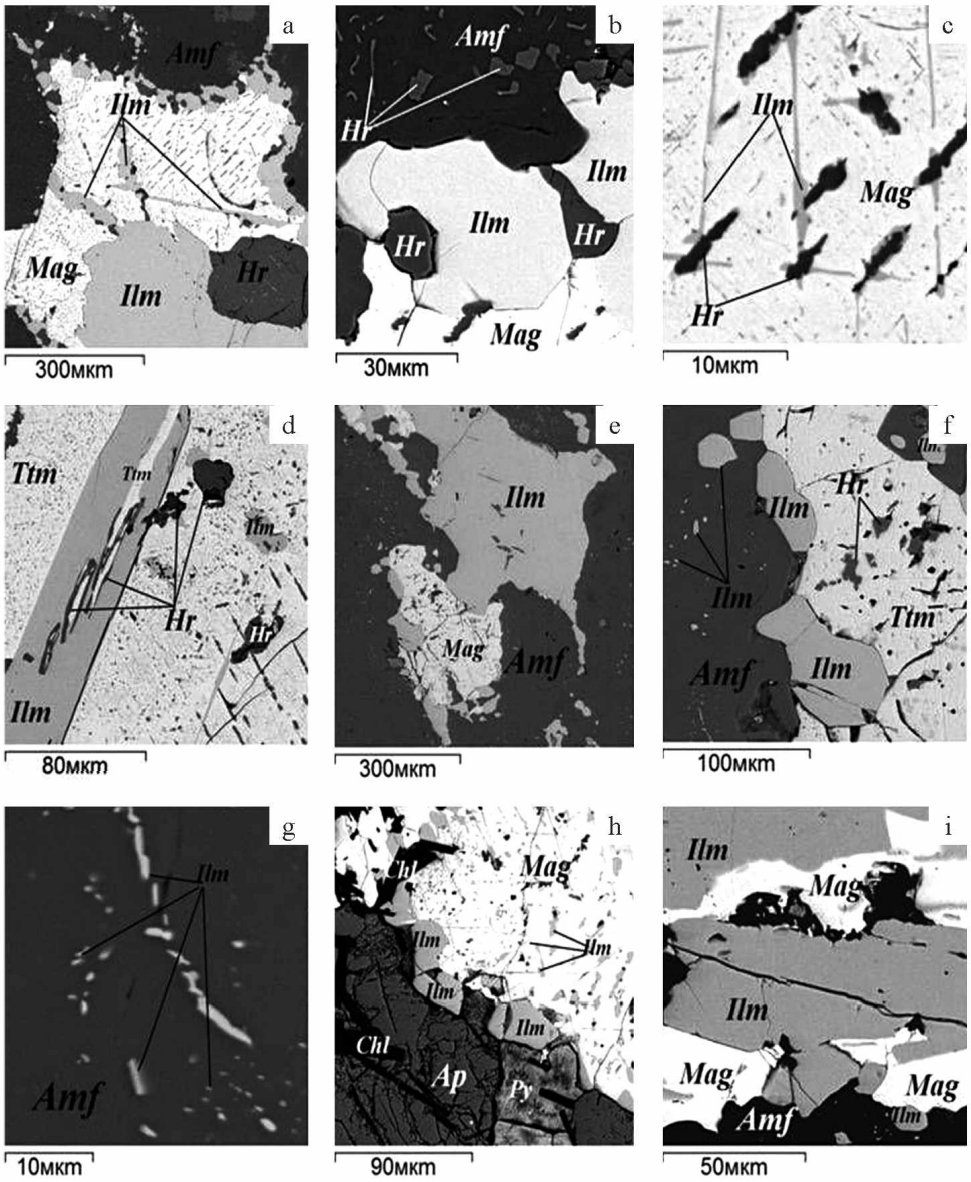


Рис. 3. Изображения в отраженных электронах (BSE). Руды Суриваары: (a) ильменит в виде отдельных неидеальных зерен разного размера и структуры разложения в магнетите; (b) срастание герцинит-ильменита на границе магнетита и амфибола; (c) мелкодисперсная структура разложения в магнетите, состоящая из удлиненного ильменита, а также в виде вкраплений эмульсии; (d) ангидридные включения ильменита и герцинита различных размеров в титаномагнетите; (e) большое срастание в амфиболе ильменита и титаномагнетита; (f) ильменит неправильной формы; (g) микровкрапление ильменита в амфиболе; (h) ильменит в виде мелких автоморфных зерен на границе зерен апатита и магнетита и микронных вкраплений в магнетите; (i) сложный ильменит-магнетитовый агрегат. Сокращения по минералам: Amf – амфибол, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Hr – герцинит, Ttm – титаномагнетит, Chl – хлорит, Ap – апатит. a – d, i – среднезернистый габбро, e – h – метагаббро

Щелочные сиениты

Щелочные сиениты (месторождение оз. Нижнее) (рис. 1, 4) состоят главным образом из микроклина $Ab_{7.5–8.5}–Or_{91.5–92}$, на долю которого приходится около 70–75% объема. Он образует таблитчатые кристаллы, часто с микродвойниковой решеткой и пертитовой структурой, обусловленной наличием тонких выделений альбита. Наряду с этим, альбит состава $Ab_{99.6}An_{0.2}Or_{0.2}$ образует и более крупные самостоятельные зерна; в целом на долю альбита приходится 15–20% объема. Нефелин в породах развит неравномерно – от практического отсутствия до 5–6 и более %; он концентрируется локально. Содержания темноцветных минералов также варьируют от нескольких процентов до 15–20%. Среди них преобладают эгирин и щелочной амфибол ряда арфведсонита, который часто замещает эгирин; в подчиненном количестве встречены железистый Ti-биотит ряда лепидомелана, магнетит и титанит.

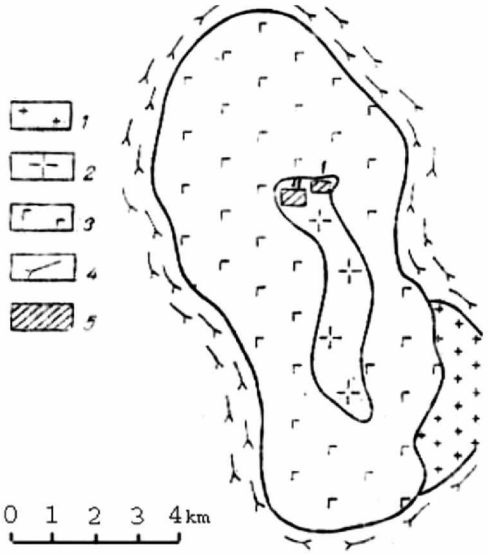


Рис. 4. Карта-схема с перспективными участками (месторождение оз. Нижнее)

Условные обозначения: 1 – гранит; 2 – щелочной сиенит; 3 – габброид; 4 – комплекс основания; 5 – детальные участки

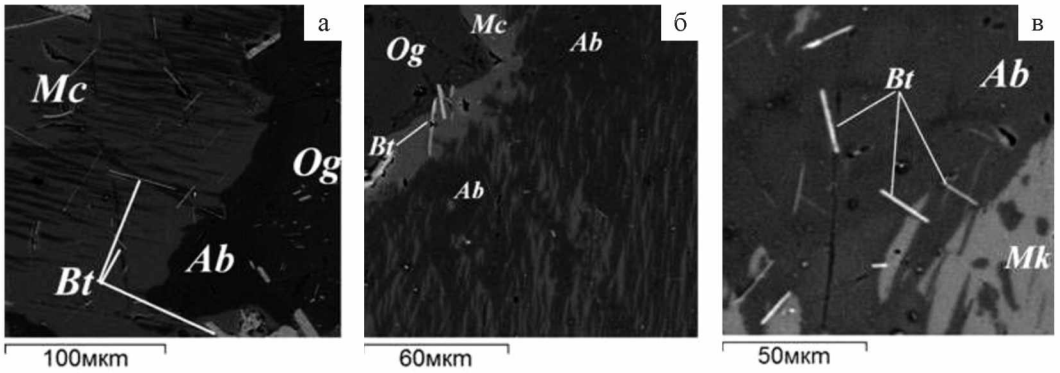


Рис. 5. Изображения в отраженных электронах (BSE) показывающие микроструктурные особенности щелочных сиенитов: (а) микроклин с пертитовыми врастаниями альбита, включениями биотита и каймой плагиоклаза вдоль границы зерен; (б) микроклин-пертитовое срастание; (в) микровключения биотита в альбите. Mc – микроклин, Bt – биотит, Ab – альбит, Og – олигоклаз

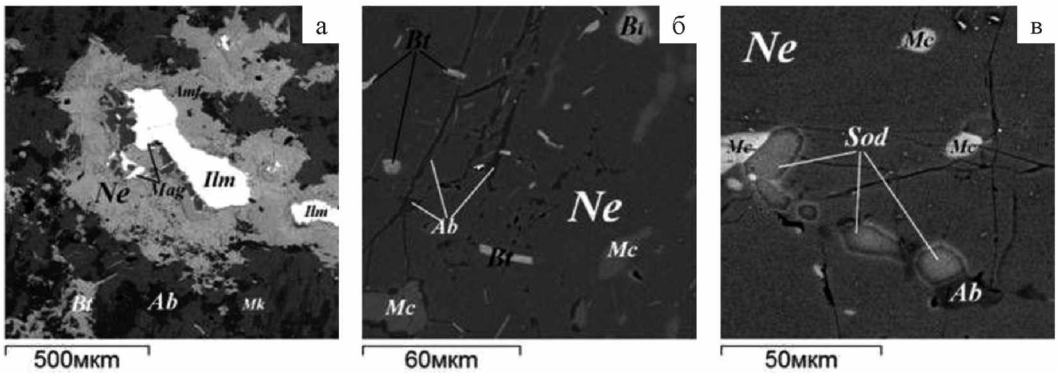


Рис. 6. Изображения в отраженных электронах (BSE), показывающие микроструктурные особенности нефелина: (а) удлиненное зерно нефелина с неровными границами, наблюдается замещение микроклина; (б) микроминеральные включения биотита и полевых шпатов в нефелине; (в) микроминеральные включения микроклина, альбита и содалита в нефелине. Mc – микроклин, Bt – биотит, Ab – альбит, Ne – нефелин, Ilm – ильменит, Amf – амфибол, Mag – магнетит

Химический и минеральный составы Елетьозерских сиенитов приводятся в работе [12]. При электронно-микроскопическом исследовании выявлены детали минеральных включений в щелочных сиенитах (рис. 5, 6).

При обогащении методом многостадийной электромагнитной сепарации получены высококачественные концентраты, состоящие из микроклина и нефелина. Нефелин-полевошпатовые концентраты сопоставимы по качеству с продуктами из нефелиновых сиенитов компании Stjern'y (Норвегия).

Карбонатиты

Карбонатиты месторождения «Карбонатитовое» размещены к югу от береговой зоны оз. Тикшеозеро. Они охватывают площадь около 2 км^2. Длина основного рудного тела по простиранию 5.4 км, ширина в раздувах до 600 м. Форма карбонатитового тела неправильная, в горизонтальном близповерхностном сечении с извилистыми контурами [10] (рис.7).

Для карбонатитов показательным критерием являются отрицательные локальные гравиметрические аномалии. Карбонатиты Тикшеозерского массива занимают секущее положение по отношению к общей структуре массива. С вмещающими силикатными породами карбонатиты имеют резкие контакты с выраженными экзоконтактовыми ореалами развития катофорито-карбонатных метасоматитов по пироксенитам, цеолитовых агрегатов с содалитом, альбитом, пренитом и эгирином по щелочным породам, с альбитом и эгирином по гранитоидам. Нередко выражено брекчирование вмещающих пород и цементирование их карбонатным материалом.

Изотопные исследования кальцитов подтверждают эндогенный источник. Впервые такой вывод сделан Г.П. Сафроновой [7]. Общие вариации изотопных значений не выходят за пределы вариаций, установленных для карбонатитов гипабиссальной глубины формирования [6].

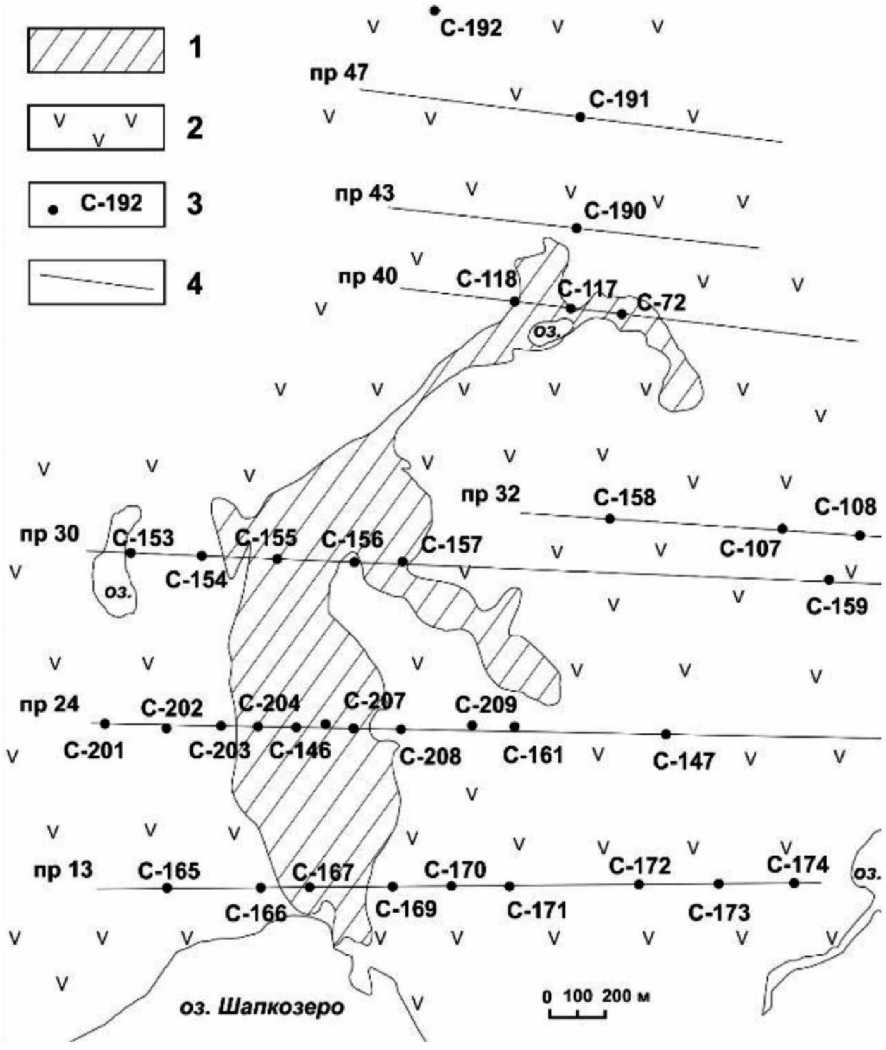


Рис. 7. Месторождение «Карбонатитовое» и разрезы (три профиля – № 30, № 24, № 13). Условные обозначения: 1 – карбонатиты; 2 – ультрабазиты и базиты. Примечание: скважины и их номера по профилям отмечены черными кружками. Составитель В. В. Щипцов

Формирование апатита было двухстадиальным: в основную интрузивную стадию и стадию метасоматоза (автометасаматоза). По окраске апатит светло-зеленоватый, розоватый с желтоватым оттенком. Показатели преломления апатита n_o= 1,640 и n_e= 1,637. Исследованные апатиты характеризуются небольшими содержаниями радиоактивных элементов U и Th, а также малой радиогенной составляющей свинца. Резко преобладают кальцитовые карбонатиты, подчиненное значение имеют доломит и анкерит.

Последние характерны для флангов карбонатитового тела и развиваются в виде полос мощностью до 5 м среди кальцитовых карбонатитов или на контакте карбонатитовых тел с магнезиальными вмещающими породами. На рис. 8 изображены в отраженных электронах формы апатитовой минерализации в карбонатитах месторождения «Карбонатитовое».

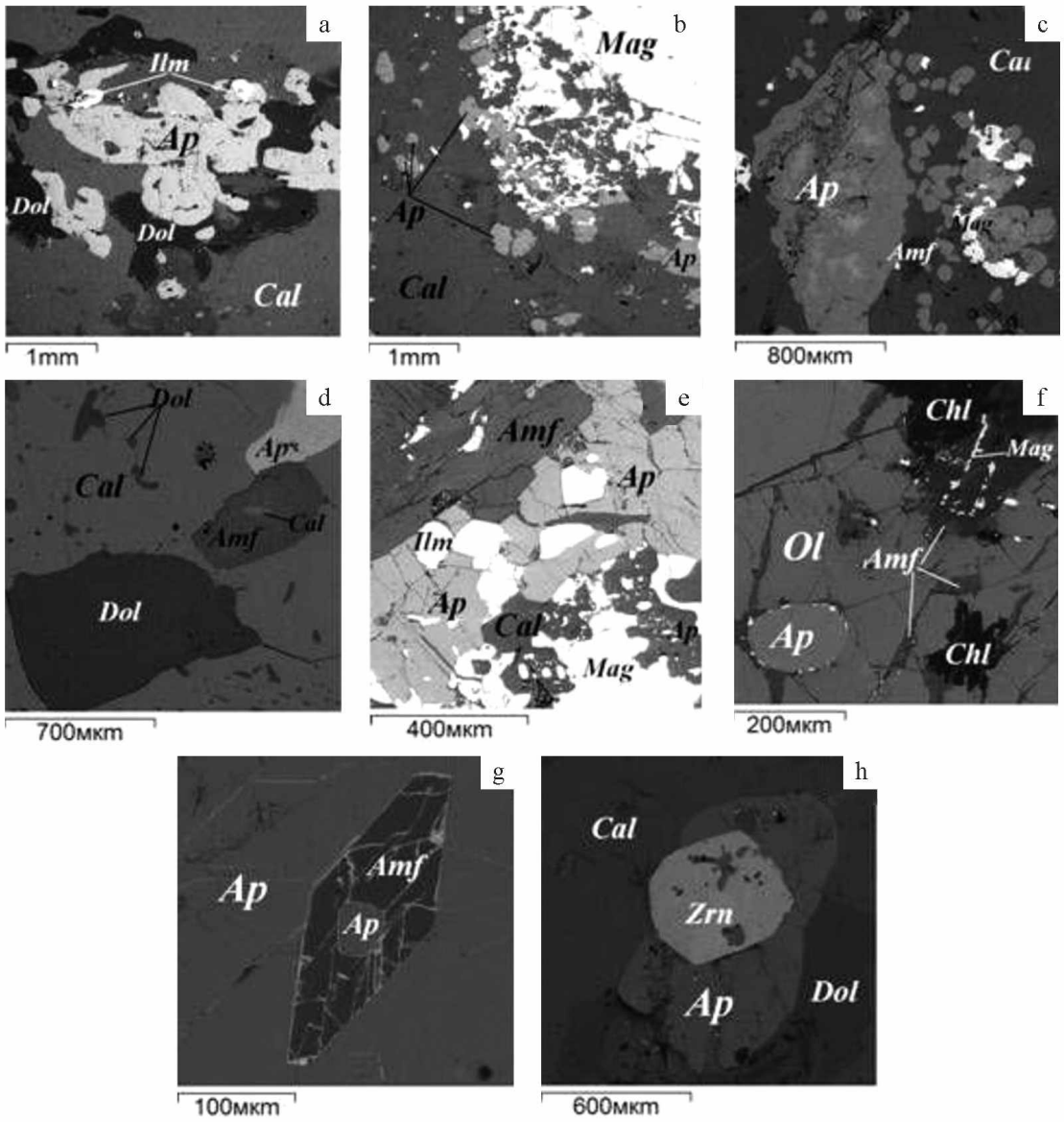


Рис. 8. Изображения в отраженных электронах (BSE). Типичные формы апатитовой сегрегации и основные минеральные ассоциации апатитсодержащих карбонатитов: (a) крупные зерна апатита неправильной формы в срастании с ильменитом, доломитом; (b) апатит-магнетитовая ассоциация в объеме кальцита; (c) крупные зерна апатита и мелкие округлые зерна апатита, сросшиеся с магнетитом; (d) зерно апатита неправильной формы, состаренное амфиболом; (e) сложный агрегат апатит-ильменит-кальцит-магнетит; (f) включения в оливине – мелкие округлые зерна апатита, хлорита, амфибола, магнетита; (g) включение амфибола в апатите; (h) включение циркона в апатите. Ap – апатит, Dol – доломит, Cal – кальцит, Ilm – ильменит, Mag – магнетит, Amf – амфибол, Ol – оливин, Zrn – циркон

Оливиниты

В западной части Тикшеозерского массива нами выделен Шапкоозерский блок площадью 15 км^2, включающий помимо дунитов оливиниты, оливиновые пироксениты и оливиновые габбро (рис. 1). Он отделен от Центрального блока меридиональной системой разломов. Вертикальная мощность меняется от 20–100 м в южной части до 200–250 м в центре и на севере блока. Химический состав оливинитов (месторождение Шапкозерское) приводится в таблице.

Химический состав оливинитов Тикшеозерского массива (месторождение Шапкозерское), мас. %

SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	ппп	NiO	CoO	V_2O_5	P_2O_5	Cr_2O_3
5.67–38.1	0–0.16	0.29–1.18	4.87–7.11	7.13–7.64	0.16	39,3–41.7	0–0.12	0.05–0.2	0.05	0.75–7.77	0.14–0.32	0.02–0.04	0.02	0.17	0.38–0.47

Редкометалльная и РЗЭ минерализация

Редкометалльная и РЗЭ минерализация выявлена в жилах щелочных пегматитов среди ильменит-магнетитовых руд Елетьозера, содержания редких металлов достигают (%): Nb – 0.5 %, Ta – 0.015, Y – 0.5 %, La – 0.1 %, Ce – 0.3 %, Hf – 0.03, Zr – 1 %, Be – 0.3 %. В титаномагнетитовых рудах отмечаются устойчиво повышенные содержания ниобия (~100 г/т), а во вмещающих их клинопироксенитах – скандия (30–40 г/т) [13]. Редкометалльная и редкоземельная минерализации Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса кореллируются с завершающей фазой становления интрузива – щелочные и нефелиновые сиениты и связанные с ними дайки бостонитов, сиенит-порфиров, жилы щелочных пегматитов, лампрофиров и брекчии взрыва [1].

Главными минералами всех разновидностей Елетьозерских пегматитов являются щелочные полевые шпаты (микроклин-пертит и альбит). В массиве выявлены 35 жил щелочных пегматитов с редкометалльным и редкоземельным оруденением, в т. ч. 25 жил расположены на участке Суриваара [1].

Заключение

Таким образом, комплексные исследования на участках с развитием в них промышленно ценного минерального сырья, как ильменит, титаномагнетит, сиениты, апатиты, оливиниты, показали промышленную значимость этих объектов. Совершенствование технологических методов переработки позволит оценить доступность недр с позиций современного взгляда на геологию, технологию, экономику и экологию и как следствие на формирование новых минерально-сырьевых потоков.

Авторы пришли к выводу, что Тикшеозерский и Елетьозерский массивы могут стать основой для формирования масштабного экономически прибыльного горнопромышленного комплекса на территории Арктической зоны Республики Карелия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ КарНЦ РАН, тема № 122042404400124-6-1.5.5

ЛИТЕРАТУРА

1. Богачев А. И., Зак С. И., Сафронова Г.П., Инина К. А. Геология и петрология Елетьозерского массива габброидных пород Карелии. Л.: Наука, 1963. 159 с.

2. Зак С.И., Киселев Ю.Ф. Отчет о поисково-разведочных работах на Елетьозерском титановом месторождении в 1954–1956 гг. Петрозаводск, фонды КГЭ, 1957.

3. Клюнин С.Ф., Сафронова Г.П. О карбонатитах Тикшеозерского массива // Опер.-инф. материалы ИГ Карельский фил. АН СССР за 1984 г. Петрозаводск, 1984. С. 8–13.

4. Кухаренко А. А., Орлова, Булах А. Г. и др. Каледонский комплекс ультраосновно-щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Карелии. Москва: 1965, Недра. 350 с.

5. Петровский М. Н., Петровская Л. С. Палеопротерозойский щелочной магматизм Мурманского неоархейского кратона Кольского полуострова // ЗРМО. 2019. № 2. С. 1–11.

6. Самойлов В. С. Геохимия карбонатитов. М., 1984. 191 с.

7. Сафронова Г. П., Гаврилова М. М. О карбонатитах Тикшеозерского массива (данные изотопного анализа кислорода карбонатитов) // Металлогения Карелии. Петрозаводск. 1982. С. 161–167.

8. Слюсарев В. Д., Кравченко А. Н., Козлов Н.Е. Новый тип щелочного магматизма Северной Карелии // Опер. информ. мат. за 1974 г. Петрозаводск, 1975. С. 98–105.

9. Шарков Е.В. Чистяков А.В., Богина М.М., Богатиков О. А., Щипцов В. В., Беляцкий Б. В., Фролов П. В. Ультрамафит-щелочно-карбонатитовые комплексы как результат двухстадийного плавления

мантийного плюма (на примере среднепалеопротерозойского Тикшеозерского интрузива, Северная Карелия, Россия) // ДАН. 2019. Т. 486. С. 460–465.

10. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Гаранжа А.В., Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Щипцова Н.И. Геолого-технологическая и экономичекая оценка ресурсного потенциала карбонатитов Тикшеозерского массива (формация ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов) // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2007. № 10. С. 159–170.

11. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Фролов П.В. Геолого-минералогическая и технологическая оценка карбонатитов и щелочных сиенитов палеопротерозойского Тикшеозерско-Елетьозерского интрузивного комплекса (Северная Карелия) // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья «Плаксинские чтения – 2021»: Материалы Международной конференции. Владикавказ: 2021, изд. СКТМИ (ГТУ). С. 126–130.

12. Щипцов В.В., Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П. Промышленные минералы Елетьозерского массива и их аналоги на Фенноскандинавском щите // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск, 2008. № 11. С. 203–220.

13. Щипцов В. В., Иващенко В. И. Минерально-сырьевой потенциал арктических районов Республики Карелия // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 2. С. 3–33.

14. Arzamastsev A. A., Wu Fu-Yuan. U-Pb Geochronology and Sr-Nd Isotopic Systematics of Minerals from the Ultrabasic Alkaline Massifs of the Kola Province // Petrology. 2014. 22, 5. P. 462–479.

15. Bai Z. J., Zhong H., Naldrett A. J., Zhu W. G., Xu G. W. Whole-rock and mineral composition of constraints on the genesis of the giant Hongge Fe-Ti-V oxide deposit in the Emeishan Large Igneous Province, Southwest China // Econ. Geology 2012. V. 107, N 3. P. 481–506.

16. Basson I., Lourens P., Paetzold H-D., Brazier T. R., Molabe P. Structural analysis and 3D modelling of major mineralizing structures at the Phalaborwa copper deposit // Ore Geology Reviews. 2017. 83. P. 30–42.

17. Brogger W. C. Due Eruptivgesteinen des Kristianiagebietes, IV. Das Fengebiet in tele marken. Norwegen – Norske Vidensk. Selsk. Scrift, I mathnaturv. 1921. 39. P. 210–222.

18. Corfu F., Bayanova T., Shchiptsov V., Frantz N. U-Pb ID-TIMS age of the Tikshozero carbonatite: expression of the 2.0 Ga alkaline magmatism in Karelia, Russia // Cent. Eur. J. Geosci. 2011. V. 3. P. 302–308.

19. Kogarko L. K., Kononova V. A., Orlova M. R., Wooley A.R. Alkaline Rock and Carbonatites of the world. Part. 2. Russia; British Museum: London, UK, 1995. P. 226.

20. Leelanandam C.; Burke K.; Ashwal L.D.; Webb S. Proterozoic mountain building in Peninsular India: An analysis based primarily on alkaline rock distribution // Geological Magazine 2006, 143 (02), P. 1–18.

21. Lintinen P. Preliminary results from new drillings and geochemical studies on the apatite deposits Kortejarvi and Petaikko-Suvantovaara carbonatites, Pudasjarvi-Posio district, Northern Finland. GSF. // Report of Investigation 207, 2014. P. 100–103.

22. Nykänen J., Laajoki K., Karhu J. Geology and Geochemistry of the Early Proterozoic Kortejärvi and Laivajoki Carbonatites, Central Fennoscandian Shield // Bull. Geol. Soc. Finland 1997, part. 1–2, 5–30.

23. O'Brien H., Heilimo E., Heino P. The Archean Siilinjärvi carbonatite complex / In: Maier W., O'Brien H., Lahtinen R. (Eds.) Mineral Deposits of Finland, Elsevier, Amsterdam» 2015. P. 327–343.

24. Precambrian geology of Finland key to the evolution of the Fennoscandian Shield / Eds M. Lehtinen, P.A. Nurmi, O.T. Rämö // Developments of Precambrian Geology, 14. 2005. 736 p.

25. Puustinen K. Geology of the Siilinjarvi carbonatite complex, Eastern Finland // Bulletin of the Geological Society of Finland 1971. V. 249. P. 43.

26. Sharkov E. V., Belyatsky B. V., Bogina M. M., Chistyakov A. V., Shchiptsov V. V.; Antonov A. V., Lepekhina T. N. Genesis and Age of Zircon from Alkali and Mafic Rocks of the Elet'ozero Complex, North Karelia // Petrology. 2015. V. 23. P. 259–280.

27. Sharkov E. V., Chistyakov A. V., Shchiptsov V. V., Bogina M.M., Frolov P.V. Origin of Fe-Ti Oxide Mineralization in the Middle Paleoproterozoic Elet'ozero Syenite-Gabbro Intrusive Complex (Northern Karelia, Russia) // Geology of ore deposits. 2018. V. 60 (2). P. 172–200.

28. Sharkov E.V., Chistyakov A.V., Bogina M.M., Shchiptsov V.V., Belyatsky B.V., Frolov P.V. Petrology of the Mid-Paleoproterozoic Tiksheozero Ultramafic–Alkaline–Carbonatite Complex (Northern Karelia) // Petrology. 2021. V. 29. N. 5. P. 475–501.

29. Shchiptsov V. V. Industrial minerals of the Tiksheozero-Eletozero alkaline ultramafic-carbonatitic and alkaline gabbroic complexes in Karelia, Russia // In Mineral deposit research for a high-tech world. 12th SGA Meeting; Uppsala, Sweden. 2013. V. 4. P. 1781–1789.

30. Smithies R. H.; Champion D. C. Late Archaean felsic alkaline igneous rocks in the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia: a result of lower crustal delamination? // Journal of the Geological Society 1999. 156 (3). P. 561–576.

31. Wooley A.R. Alkaline Rock and Carbonatitesof the world. Part. 1: North and South America; British Museum: London, UK. 1987. P. 215.

32. Yuhara M., Kohno R., Kagami H., Hiroi Y., Tsuchiya T. Geochemistry of syenite of the Phalaborwa Carbonatite Complex, South Africa // Polar Geosci. 2003. V. 16. P. 176–195.

33. Zhou M.F., Chen W.T., Wang C.Y., Prevec S.A., Liu P.P., Howarth G. Two stages of immiscible liquid separation in the formation of Panzhihua-type of Fe-Ti-V oxide deposits, SW China // Geoscience Frontiers, China. 2013. V. 4 (5). P. 481–502.

DOI: 10.17076/TM15_53

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗРАБОТКИ АЛЛЮВИАЛЬНОЙ РОССЫПИ МОНАЦИТА (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Корольков А. Т.

Иркутский государственный университет, Иркутск

Введение

Минерал монацит тесно связан с гранитоидами, для которых является акцессорным. Формула монацита отвечает фосфату, который имеет несколько разновидностей: 1) цериевый (Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO_4; 2) лантановый (La, Ce, Nd, Pr)PO_4 (до 28,95 % лантана); 3) неодимовый (Nd, La, Ce, Pr)(P, Si)O_4; 4) самариевый $SmPO_4$ (до 13,59 % самария); 5) празеодимовый (Pr, Nd, Ce, La)PO_4. Цериевая разновидность монацита содержит до 10 % тория, что стало определяющим для разработки монацитовой аллювиальной россыпи в Балейском районе. Этот минерал имеет красновато-бурый цвет, большую твердость (5) и плотность (4,6–5,7 г/см). В аллювиальных отложениях накапливается аналогично и совместно с золотом. Минерал радиоактивный из-за содержащихся в нем редких земель и тория. Естественно, степень радиоактивности зависит от его количества в породе. При распаде тория образуется газ радон, который накапливается в воде, почве, воздухе и создает экологические проблемы для местных жителей. Геология Балейского района известна крупными коренными и россыпными месторождениями золота, которые интенсивно отрабатывались с начала до середины XX века и дали стране более 400 тонн золота. Самыми крупными являются убого-сульфидные месторождения Балейское, Тасеевское, Каменских конгломератов, локализованные в грабене с нижнемеловыми субконтинентальными осадками. Разработка таких месторождений потребовала строительства двух золотоизвлекательных фабрик, после которых остались крупные хвостохранилища с ртутными и цианистыми растворами. Одно из таких хвостохранилищ протянулось в сторону мкр. Новотроицка и поглотило несколько улиц. Цепь нижнемеловых грабенов протягивается в северо-восточном направлении в пределах Ундино-Даинской впадины северо-восточного простирания, сложенной терригенно-вулканогенными породами верхнеюрского возраста. С юга эта впадина обрамляется ундинскими гранитоидами пермского возраста, которые вмещают ряд верхнеюрских золото-сульфидных месторождений золота (Голготайское, Андрющинское, Сосновское, Алиинское и др.). Северная граница впадины оконтуривается Борщевочным комплексом метаморфического ядра с позднеюрскими одноименными гранитоидами в центральной части, содержащими акцессорный монацит. Аллювиальные отложения рек, размывающих борщевочные гранитоиды, в различной степени обогащены монацитом. Наиболее крупные скопления монацита разведаны были П. М. Хреновым в 1948 году в реке, пересекающей мкр. Новотроицк.

Ликвидация последствий работы предприятия № 1084

Торию придавалось большое значение для изготовления атомных бомб. Позже была разработана другая технология на основе урана [2]. Но в 1949 году оперативно в мкр. Новотроицке было организовано секретное предприятие № 1084 по разработке монацитовой россыпи. Первым директором назначили И. И. Легейдо, до этого возглавлявшего ИРГИРЕДМЕТ в г. Иркутске, что само по себе свидетельствовало о важности проекта. В мкр. Новотроицк быстрыми темпами была построена фабрика по получению монацитового концентрата, школа, дом культуры, баня, амбулатория, аптека, магазины с очень хорошим снабжением и множество жилых домов. Для работы привлекались крупные специалисты из Иркутска и других городов, местное население и многочисленные рабочие, приехавшие из европейской части СССР. В 90-х годах XX века обнаружилась неблагоприятная экологическая обстановка в г. Балее и его окрестностях, связанная с последствиями отработки монацитовой россыпи. Вот как это отражено в работе В. И. Булатова [1]: «У п. Новотроицка в месте переработки торий- и урансодержащих монацитовых песков наблю-

дается аномалия площадью 3 км^2. На чердаках домов лежит радиоактивный шлак… В г. Балее обследовано 77 объектов, в 15 из них обнаружено высокое излучение (амбулатория – 630, детсад «Саранка» – 250, Дом культуры – 2500, два жилых дома – 800 мкР/ч). Здесь же в полотне дороги найден мощный (50 Р/ч) техногенный источник… В селах имеются радиоактивные телятники… В Балее остро стоит проблема радона». В период с 2013–2015 гг. ФГУП «РосРАО» были проведены работы по дезактивации и частичной рекультивации ряда объектов на территории, прилегающей к бывшим объектам предприятия [3]. В ходе работ ликвидированы аварийные строительные объекты, загрязненные торием, а также рекультивировано 35 участков, имеющих следы радиоактивного загрязнения (общая площадь 11 га).

Геохимическая характеристика почв

В мкр. Новотроицке население живет преимущественно в частных домах и активно использует урожай со своих огородов. Экологическое состояние почв является очень важным показателем для них. В наиболее загрязненной части поселка вблизи жилых домов на шести участках были отобраны пробы почв из центральной части мкр. Новотроицк г. Балея по профилю от хвостохранилища бывшей обогатительной фабрики для извлечения ториевого концентрата из монацитового песка через долину реки с отработанной аллювиальной монацитовой россыпью до хвостохранилища золотоизвлекательных фабрик [4]. Элементный состав проб определен методом полуколичественного дугового атомно-эмиссионного анализа с визуальной интерпретацией спектров в аналитическом центре Института геохимии СО РАН. U и Th были проанализированы из дубликатов тех же проб методом рентгенофлуоресцентного анализа в ПГО «Сосновгеология». Интерпретация полученных данных показала высокие содержания ряда элементов, значительно превышающие ПДК. Суммарный показатель загрязнения почв (индикатор загрязнения), рассчитанный по пяти химическим элементам (Pb, As, Sb, Ag, Th), указывает на умеренно опасную (4 пробы), опасную (2 пробы) и чрезвычайно опасную (1 проба) для здоровья населения экологическую обстановку. При умеренно опасной ситуации наблюдается общая заболеваемость населения; при опасной растет число часто болеющих детей с хроническими заболеваниями, нарушениями функций сердечно-сосудистой системы; при чрезвычайно опасном содержании элементов отмечается увеличение заболеваемости детского населения, нарушение репродуктивной функции женщин (увеличение токсикозов беременности, числа преждевременных родов, мертворождаемости, гипотрофии новорожденных). В обобщенном виде это соответствует состоянию здоровья населения Новотроицка.

Современная радиоактивность долины реки с монацитовой россыпью

В последние годы, несмотря на проведенную рекультивацию в пределах монацитовой долины мкр. Новотроицка, выявлен ряд участков, мощность дозы на территории которых превышает безопасный уровень 0.60 мкЗв/ч [5]. 1 микрозиберт (мкЗв) соответствует 100 мкР/ч. На участке № 1 (окрестность бункера руды) доза составляет 0.92 мкЗв/ч, что обусловлено накоплением торий-содержащей руды вблизи бункера. Крупное площадное загрязнение на участке № 3 предположительно обусловлено эрозией почвы со стен карьера – руда регулярно смывается осадками и скапливается вблизи русла реки Кибиревка, протекающей через карьер. Аналогичная ситуация наблюдается и для загрязнённых участков № 2, 4, 5, 7. На участке № 6 (окрестность песчаной насыпи на обочине дороги большегрузного транспорта) зафиксировано максимальное значение дозы радиации – 1.30 мкЗв/ч.

Выводы

До 1990-х гг. прошлого века жители не представляли всей опасности проживания в п. Новотроицке. Впоследствии было снесено и отремонтировано множество сооружений, имеющих высокий радиационный фон. Но принятых мер недостаточно. Для г. Балея требуется проведение комплексных эколого-геохимических работ, включающих: а) детальное изучение и мониторинг радиационной обстановки, б) исследование подземных и поверхностных вод, в) опробование почв на всей площади города, г) геохимический мониторинг хвостохранилищ, д) медицинские и социологические исследования, е) опытные работы на зараженных участках по применению современных адсорбентов, поглощающих тяжелые металлы и радиоактивные газы. Для геохимического исследования почв предлагается использовать количественные методы химического анализа с пределами обнаружения в 2–10 раз ниже ПДК токсичных элементов.

Актуальной проблемой является оценка вклада аэрозольного переноса загрязнителей в период транспортировки шламов золотоизвлекательных фабрик по территории мкр. Новотроицк. Все эти работы требуют значительного финансирования, которое отсутствует у городской администрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булатов В. И. Россия радиоактивная. Новосибирск: ЦЭРИС, 1996. 272 с.

2. Корольков А. Т. Монацитовая проблема города Балея // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2016. № 1 (54). С. 96–103.

3. Ликвидация ядерного наследия: 2008–2015 годы. Под общ. Ред. А. А. Абрамова, О. В. Крюкова, И. И. Линге. М.: Изд-во Энергопроманалитика, 2015. 161 с.

4. Маркин Н. С., Корольков А. Т. Геохимическая характеристика почв наиболее загрязненной части Балея (Забайкальский край) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 35. С. 71–83.

5. Маркин Н. С., Иванников С. И., Егорин А. М. Оценка радиоэкологической обстановки на объектах бывшего Новотроицкого рудоуправления, г. Балей (Забайкальский край) // Экология и промышленность России. 2022. Том 26. № 5. С. 37–43.

DOI: 10.17076/TM15_54

ВЫЯВЛЕНИЕ ФАЗ В ВОЛЬФРАМОВЫХ КОНЦЕНТРАТАХ, НЕГАТИВНО ВЛИЯЮЩИХ НА ИХ КАЧЕСТВО

Радомская Т. А., Канева Е. В., Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Чуешова А. Г., Белозёрова О. Ю., Митичкин М. А., Айсуева Т. С.

Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск

Введение

Вольфрам входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства РФ от 30.08.2022 № 2473-р. Несмотря на значительные размеры российской сырьевой базы вольфрама, в ее составе практически отсутствуют резервные объекты, содержащие рентабельные для отработки руды и представляющие интерес для недропользователей [5]. Количество запасов вольфрама, вовлеченных в отработку, незначительно, что во многом обусловлено их исчерпанием на действующих рудниках вследствие длительной эксплуатации [2]. В связи с этим актуально решение проблемы сырьевого дефицита через внедрение более совершенных технологий переработки руд и техногенных запасов. Одним из таких объектов является Барун-Нарынское техногенное месторождение (Республика Бурятия), которое представляет собою отвалы и лежалые хвосты, распложенные на территории Джидинского вольфрамо-молибденового комбината, действующего с 1934 по 1996 годы. За этот период были накоплены техногенные отходы в количестве 44,5 млн тонн. Государственным балансом РФ учитываются техногенные запасы триоксида вольфрама для открытой отработки по категории C_1 в количестве 12 337 тонн, по категории C_2 – 428 тонн, забалансовые (отвалы) – 4743 тонны [1]. Разработкой хвостохранилищ Джидинского вольфрамо-молибденового комбината занимается предприятие АО «Закаменск», производящее вольфрамовые концентраты. Содержание WO_3 в концентратах, произведенных в 2020 г. АО «Закаменск» изменялось в пределах 35–37 мас. %, при этом уровень извлечения WO_3 в товарную продукцию варьировал от 24 до 87 мас. %, в среднем составляя 60 мас. % [2]. Разработка технологий комплексной переработки техногенных отвалов и лежалых хвостов сопровождается исследованием минерального состава продуктов переработки с целью выявления фаз, негативно влияющих на качество вольфрамового концентрата.

В данной работе приводятся результаты исследования минерального и химического состава двух проб мелкозернистого и тонкозернистого вольфрамовых концентратов, полученных

в результате обогащения лежалых хвостов Барун-Нарынского техногенного месторождения, с целью выявления фаз, снижающих качество конечного продукта.

Материалы и методы

Вольфрамовые концентраты разделялись по удельному весу минералов на тяжёлую и лёгкую фракции гравитационным методом с помощью трибромметана. Электромагнитное разделение тяжёлой фракции по магнитности минералов на четыре электромагнитные фракции проводилось с помощью сепаратора изодинамического магнитного (СИМ-1) с предварительным удалением сильной магнитной фракции с помощью магнита. Полуколичественный минералогический анализ четырёх электромагнитных и лёгкой фракции, полученных из вольфрамового концентрата, проводился оптико-минералогическим методом. Полученные в результате гравитационного и электромагнитного разделения фракции монтировались в шашки с помощью эпоксидной смолы для микроскопического исследования и изучения фазового состава вольфрамового концентрата на сканирующем электронном микроскопе. Минераграфическое исследование фракций вольфрамового концентрата с целью идентификации минералов по оптическим свойствам в отражённом свете проводилось с использованием микроскопа Olympus BX-51 с функциями проходящего и отражённого света, оснащённого фотоаппаратом Olympus.

Исследование вольфрамовых концентратов и фракций выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Химический состав микрообъемов твердого вещества и фазового состава фракций вольфрамового концентрата определялся рентгеноспектральным микроанализом с помощью энергодисперсионного спектрометра (система энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 с безазотным детектором, Oxford Instruments Analytical Ltd., Англия) на сканирующем электронном микроскопе Tescan MIRA 3 LMH.

Минеральный состав и полуколичественное содержание фаз определялись методом порошковой рентгеновской дифракции с использованием дифрактометра D8 ADVANCE Bruker, оснащенного сцинтилляционным детектором и зеркалом Gobel при пошаговом режиме съемки в диапазоне 4–70° 2θ, используя *CuKa* источник излучения.

Полуколичественное определение элементного состава проб выполнено методом атомно-эмиссионной спектрометрии (ПКАЭС) с помощью спектрографа СТЭ-1 способом полного испарения проб из канала графитового электрода в плазму вертикальной дуги переменного тока при фотографической регистрации и визуальной интерпретации спектров. Определение содержаний элементов проводилось по способу испарения вещества из канала графитового электрода: в дуге переменного тока при фотографической регистрации и визуальной интерпретации спектров.

Определение серы в пробах выполнено методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра Bruker CTX-800 в аналитическом отделе исследования геологических образцов научно-учебной лаборатории экспериментальной геологии ИГУ.

Результаты исследования

Размер большей части зёрен в мелкозернистом вольфрамовом концентрате (К-107) варьируется в пределах от 0.3 до 0.16 мм, в то время как в тонкозернистом вольфрамовом концентрате (К-86) – от 0.2 мм и мельче. Мелкие размеры зёрен концентрата К-86 затрудняют его разделение, как в тяжёлой жидкости, так и с помощью электромагнитного сепаратора. Выход лёгкой фракции из обоих концентратов незначителен и составляет 0.3 и 0.6 мас. % для мелкозернистого и тонкозернистого концентрата соответственно (табл. 1, 2).

В результате электромагнитного разделения вольфрамовых концентратов по магнитности минералов было получено четыре вида фракций: сильномагнитная, магнитная, среднемагнитная, немагнитная.

Сильномагнитная фракция была выделена ручным магнитом и дочищалась на электромагнитном сепараторе с силой тока не более 0.2 А. Она составила 1.5 и 4.3 мас. % от общей массы мелкозернистого и тонкозернистого концентрата соответственно. Данная фракция преимущественно состоит из магнетита, в меньшей степени гематита, гётита и ильменита (табл. 1, 2). В сростках с магнитными минералами отмечаются пирит, слюды, гюбнерит, шеелит, полевые шпаты, кварц, монацит. Пирит обычно имеет кайму из гематита и гётита. Эта фракция по содержанию массовой доли общего железа (60 мас. %) соответствует богатым железным рудам [3].

Таблица 1

Минеральный состав мелкозернистого (К-107) вольфрамового концентрата и фракций, полученных в результате гравитационной и электромагнитной сепарации

Индекс пробы	107	107-Лфр	107-Тфр-СМ	107-Тфр-М	107-Тфр-СрМ	107-Тфр-НМ
Обозначение фракции	Исходный концентрат:	Лёгкая фракция	Тяжёлая фракция			
			Сильно-магнитная I < 0,1 А	Магнитная 0,4 < I > 0,1 А	Средне-магнитная 1,4 < I > 0,4 А	Немагнитная I > 1,4 А
Выход фракции, мас. %	100.0	0.3	1.5	58.7	11.8	27.7
Минерал	1	2	3	4	5	6
Гюбнерит*’	**59.8**	**1.2**	0.9	**90.7**	**53.8**	0.6
Шеелит*’	**24.3**	зн.	0.7	**1.4**	**24.0**	**74.6**
Пирит*’	**4.8**	0.4	**1.1**	0.5	**2.6**	**15.1**
Магнетит*’	**1.2**	н.о.	**77.6**	зн.	н.о.	н.о.
Ильменит	0.2	0.8	**7.7**	0.2	н.о.	н.о.
Гематит*’ гётит’	**3.2**	н.о.	**10.0**	**5.2**	н.о.	н.о.
Рутил*’	0.4	0.7	н.о.	0.3	**1.2**	0.4
Эпидот*’	**1.4**	**14.0**	н.о.	зн.	**11.1**	н.о.
Циркон*’	0.6	0.1	зн.	зн.	0.2	**1.9**
Флюорит*’	**1.6**	**20.4**	0.01	зн.	зн.	**5.7**
Слюды: мусковит*’, флогопит’	0.7	**10.0**	**1.6**	0.6	0.6	0.9
Калиевые полевые шпаты	0.1	**20.2**	зн.	зн.	зн.	зн.
Плагиоклаз*	0.2	**18.1**	0.4	зн.	0.2	0.4
Кварц*’	0.2	**9.9**	зн.	зн.	**1.1**	зн.
Апатит’	0.1	**4.1**	н.о.	н.о.	зн.	0.4
Монацит’	**1.2**	н.о.	н.о.	**1.1**	**4.6**	зн.
Уранинит’	зн.	н.о.	н.о.	н.о.	0.1	н.о.
Сульфосоли висмута’	зн.	н.о.	н.о.	зн.	0.2	зн.
Галенит	зн.	н.о.	н.о.	зн.	0.3	зн.
Штольцит*’	зн.	зн.	н.о.	зн.	зн.	зн.
Халькопирит’	зн.	н.о.	н.о.	зн.	зн.	зн.
Сфалерит’	зн.	н.о.	н.о.	н.о.	зн.	зн.

Примечание: диагностика минералов и определение их полуколичественного содержания проводилось комплексно: оптико-минералогическим и минераграфическим методами, рентгенофазовым анализом (*) и рентгеноспектральным микроанализом (’).

Таблица 2

Минеральный состав тонкозернистого (К-86) вольфрамового концентрата и фракций, полученных в результате гравитационной и электромагнитной сепарации

Индекс пробы	86	86-Лфр	86-Тфр-СМ	86-Тфр-М	86-Тфр-СрМ	86-Тфр-НМ
Обозначение фракции	Исходный концентрат	Лёгкая фракция	Тяжёлая фракция			
			Сильно-магнитная I < 0,1 А	Магнитная 0,35 < I > 0,1 А	Средне-магнитная 1,4 < I > 0,35 А	Немагнитная I > 1,4 А
Выход фракции, мас.%	100.0	0.6	4.3	49.6	5.1	40.4
Минерал	1	2	3	4	5	6
Гюбнерит*’	**43.6**	**1.2**	0.4	**84.9**	**20.6**	0.9
Шеелит*’	**29.6**	Зн.	0.3	**1.3**	**46.2**	**65.8**
Пирит*’	**9.6**	0.9	**2.8**	**1.0**	**9.7**	**20.9**
Магнетит*’	**3.5**	Н.о.	**82.3**	Зн.	Н.о.	Н.о.
Ильменит’	**3.4**	0.4	**3.2**	**6.6**	Зн.	Н.о.
Гематит*’ и гётитэ’	**3.2**	Зн.	**9.7**	**5.7**	Зн.	Н.о.
Рутил*’	0.8	0.6	Зн.	Н.о.	**1.7**	**1.8**
Эпидот*’	**2.0**	**3.3**	Зн.	Н.о.	**14.8**	**3.1**
Циркон*’	**1.0**	0.1	0.1	Зн.	0.5	**2.5**
Флюорит*’	0.9	**15.1**	Зн.	Зн.	Зн.	**2.1**
Слюды: мусковит*’, флогопит*	0.9	**8.6**	0.6	Зн.	**1.7**	**1.7**
Калиевые полевые шпаты’	0.2	**15.1**	Зн.	Зн.	**2.4**	Зн.
Плагиоклаз альбит*’	0.5	**24.2**	0.6	0.1	**1.2**	0.6
Кварц*’	0.2	**28.2**	Зн.	Зн.	Зн.	Зн.
Апатит’	0.2	**2.2**	Н.о.	Н.о.	Зн.	0.5
Монацит’	0.2	Н.о.	0.1	0.4	0.5	Зн.
Уранинит’	Зн.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Зн.	Зн.
Сульфосоли висмута’	Зн.	Н.о.	Зн.	Зн.	0.8	Зн.
Галенит’	Зн.	0.2	Н.о.	Н.о.	Зн.	Зн.
Штольцит*’	Зн.	Зн.	Н.о.	Зн.	Зн.	Зн.
Халькопирит’	Зн.	Зн.	Зн.	Н.о.	Зн.	Зн.
Сфалерит’	Зн.	Н.о.	н.о.	н.о.	Зн.	Зн.
Сидерит’	Зн.	Н.о.	Зн.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Гранат спессартин’	Зн.	Н.о.	Н.о.	Зн.	Н.о.	Н.о.

Примечание: диагностика минералов и определение их полуколичественного содержания проводилась комплексно: оптико-минералогическим и минераграфическим методами, рентгенофазовым анализом (*) и рентгеноспектральным микроанализом (’).

Магнитная фракция концентратов преимущественно состоит из гюбнерита (85–91 мас. %) и является самой объёмной фракцией – 58.7 и 49.6 мас. %, выделенной из мелкозернистого и тонкозернистого концентратов соответственно. Сила тока, при которой происходила сепарация, составляла не более 0.4 и 0.35 А для мелкозернистого и тонкозернистого концентратов. Магнитные фракции по содержанию вольфрама (50 мас. %) соответствуют техническим требованиям, предъ-

являемым к вольфрамит-гюбнеритовым концентратам 3 сорта – КВГ-3 по [4]. В качестве второстепенных минералов в этой фракции отмечаются гематит, гётит, ильменит, слюда, пирит, монацит, рутил, сростки гюбнерита и шеелита (табл. 1, 2). В виде единичных знаков встречаются штольцит, магнетит, циркон, эпидот, полевые шпаты, кварц, галенит, сульфосоли висмута.

Среднемагнитная фракция сепарировалась в интервале от 0.35–0.4 до 1.4 А. В эту фракцию отделяются преимущественно сростки гюбнерита и шеелита, что приводит к неизбежной потере вольфрама при данной схеме обогащения. Выход этой фракции составляет всего 11.8 и 5.1 мас. % для мелкозернистого и тонкозернистого концентратов, соответственно. В эту фракцию отделяется основная часть Th- и U-содержащих минералов – монацита и уранинита. Они вносят радиоактивный вклад в вольфрамовые концентраты. Эти два минерала отходят в узкий интервал с силой тока от 0.6 до 0.9 А. В тонкозернистом концентрате (К-86) меньше радиоактивных минералов и гюбнерита, но больше шеелита по сравнению с мелкозернистым концентратом (К-107). Данная фракция обогащена La (0.8–3.0 мас. %) и Ce (1–2 мас. %).

Немагнитная фракция занимает значительный объём – 27.7 и 40.4 мас. % для мелкозернистого и тонкозернистого концентратов соответственно, и преимущественно состоит из шеелита с подчинённым количеством пирита, флюорита, циркона, рутила, эпидота, слюды и апатита. В сростках с шеелитом обнаруживаются гюбнерит и штольцит. В виде единичных знаков отмечаются сфалерит, галенит, халькопирит, сульфосоли висмута, монацит, кварц и плагиоклаз. Концентрация серы в немагнитной фракции составляет 9.07 и 5.91 мас. % для тонкозернистого и мелкозернистого концентрата соответственно. Немагнитные фракции по содержанию всех регламентируемых элементов кроме серы (<1.5 мас. %) соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к шеелитовым твердосплавным концентратам 3 сорта – КВГ-3 по [4]. В исходной фракции содержание серы превышает содержание 0.8 мас. %, требуемое по [4], и составляет 3.9 и 1.99 мас. % в тонкозернистом и мелкозернистом концентрате. Сера входит в состав сульфидов, преимущественно пирита, который может быть легко удалён из немагнитного концентрата флотационными методами обогащения. Этот процесс можно выполнить до разделения исходного вольфрамового концентрата методами магнитной сепарации.

Выводы

Таким образом, вольфрамовые концентраты, полученные из лежалых хвостов Барун-Нарынского техногенного месторождения, в качестве вредной примеси содержат серу, концентрация которой превышает допустимые значения [4]. К негативным фазам, присутствующим в концентратах, относятся Th- и U-содержащие минералы – монацит и уранинит. Обогащение вольфрамовых концентратов с помощью электромагнитной сепарации позволяет повысить их качество, удалить негативные фазы и получить несколько видов сырья: вольфрамит-гюбнеритовый концентрат 3 сорта и шеелитовый твёрдосплавный концентрат. Кроме вольфрамовых концентратов в результате разделения исходного концентрата была получена магнетитовая фракция, соответствующая богатым железным рудам. Монацит-содержащая фракция, выделенная электромагнитной сепарацией, обогащена редкоземельными элементами (лантаном и церием), которые наряду с вольфрамом входят в перечень основных видов стратегического минерального сырья.

Исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН в рамках исполнения государственного задания по Проекту № 0284-2021-0008.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2021 года. Выпуск 15: Вольфрам // ФГБУ «Росгеолфонд». 2021. 138 с.

2. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Под ред. Петрова Е. И. и Тетенькина Д. Д. Москва, 2021. 572 с.

3. ГОСТ Р 52939-2008 Руды железные товарные необогащённые. Общие технические условия. Москва: ФГУП Стандартинформ, 2008. 12 с.

4. ГОСТ 213-83 Концентрат вольфрамовый. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. 7 с.

5. Лаптева А. М. Ситуация на мировом вольфрамовом рынке и возможности российской сырьевой базы вольфрама // Отечественная геология. 2018. № 1. С. 29–39.

DOI: 10.17076/TM15_55

СУЛЬФИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ ИЗ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Комарова А. Г.[1, 3], *Чикишева Т. А.*[1, 2, 3], *Прокопьев Е. С.*[1, 2], *Прокопьев С. А.*[1, 2]

[1] *ООО НПК «Спирит», Иркутск*
[2] *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*
[3] *Иркутский государственный университет, Иркутск*

Введение

Медистые песчаники являются одним из девяти типов промышленных месторождений меди, который имеет высокое значение в общем балансе запасов меди не только в России, но и за рубежом. Забайкальский край является единственным субъектом в РФ, на территории которого выделяется геолого-промышленный тип месторождений медистых песчаников. Запасы меди Забайкальского края составляют почти четверть от общих российских запасов [5]. Также кроме крупных запасов меди в них сосредоточены запасы золота и серебра.

Изучение взаимоотношений породообразующих и рудных минералов имеет большое значение при проведении поисково-оценочных работ, предварительной разведки и для создания технологии разработки месторождения. Текстурно-структурные характеристики руды и характер вкрапленности определяют технологические типы сростков и динамику раскрытия минералов при измельчении руды [6], поэтому изучение структурных взаимоотношений минералов способствует разработке эффективной технологии переработки минерального сырья.

Материалы и методы

Объектом исследований в данной работе послужила усредненная технологическая проба руды, относящаяся к промышленному типу медистых песчаников и алевролитов [4], в которой попутными ценными компонентами выступают золото и серебро.

Минералого-технологическое изучение руды провено в минералогическом отделе ООО НПК «Спирит». Работа осуществлялась в соответствии с методическими руководствами Научного совета по методам минералогических исследований (НСОММИ) [1, 2, 3] с применением бинокулярного стереомикроскопа Микромед МС-2-ZOOM 2CR, сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMH TESCAN в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и поляризационного микроскопа Olympus BX53-F в научно-учебной лаборатории экспериментальной геологии геологического факультета ИГУ. Рентгенографический анализ выполнялся в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН на дифрактометре ДРОН-3.0.

Результаты и обсуждение

При визуальном анализе образцов руды было установлено, что они представлены изменёнными осадочными образованиями, рассеченными кварцевыми прожилками, с которыми ассоциирует медно-сульфидная минерализация. Сульфиды меди – борнит и халькопирит находятся в тесном срастании друг с другом и визуализируются в виде вкраплений, гнёзд и прожилков.

Оптико-микроскопические исследования показали, что вмещающие породы представлены мелкозернистыми аркозовыми метапесчаниками – однородными массивными или слабо сланцеватыми, иногда слоистыми (рис. 1). В минеральном составе преобладают кварц и измененный калиевый полевой шпат, замещённый мусковитом и глинистыми минералами. Плагиоклазы, мусковит и хлорит имеют второстепенное значение. Зёрна главных минералов имеют сложный характер границ. Хлорит обнаружен в образцах в виде редко встречающихся отдельных чешуй и листоватых агрегатов. Порода пронизана кварцевыми жилами – в основном они сложены среднезернистым гранобластовым кварцем. Кальцит наблюдается в зонах контакта метапесчаника с кварцевыми жилами и в самих жилах (рис. 2). Редко обнаруживается гидротермальный халцедон.

Сульфидная минерализация связана с прожилками кварцевого состава, а также проявлена в виде рассеянных гнёзд и вкраплений

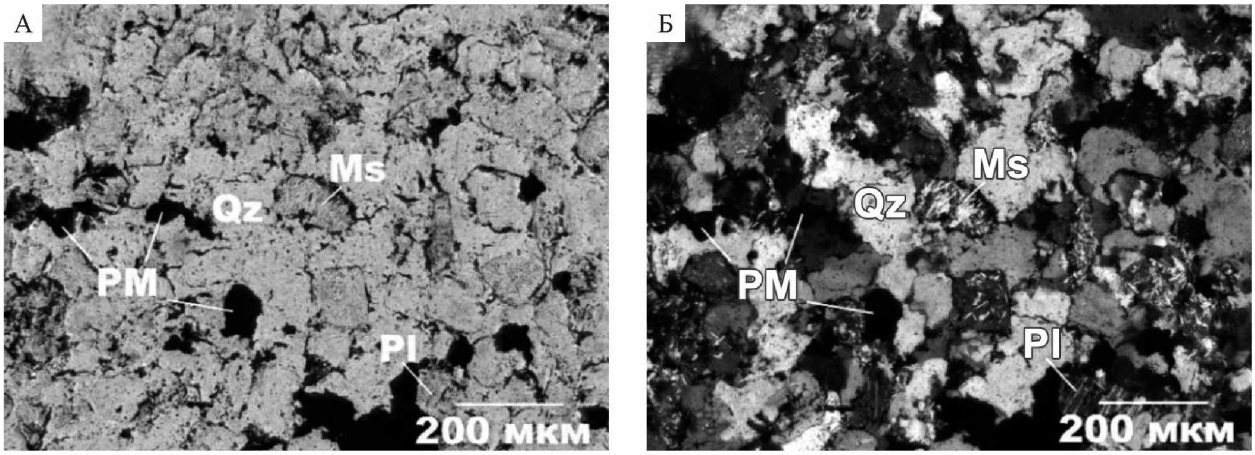


Рис. 1. Микрофотографии фрагмента кварцевого песчаника с массивной текстурой в проходящем свете. А – анализатор выключен, Б – анализатор включен. Qz – кварц, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит, PM – рудный минерал

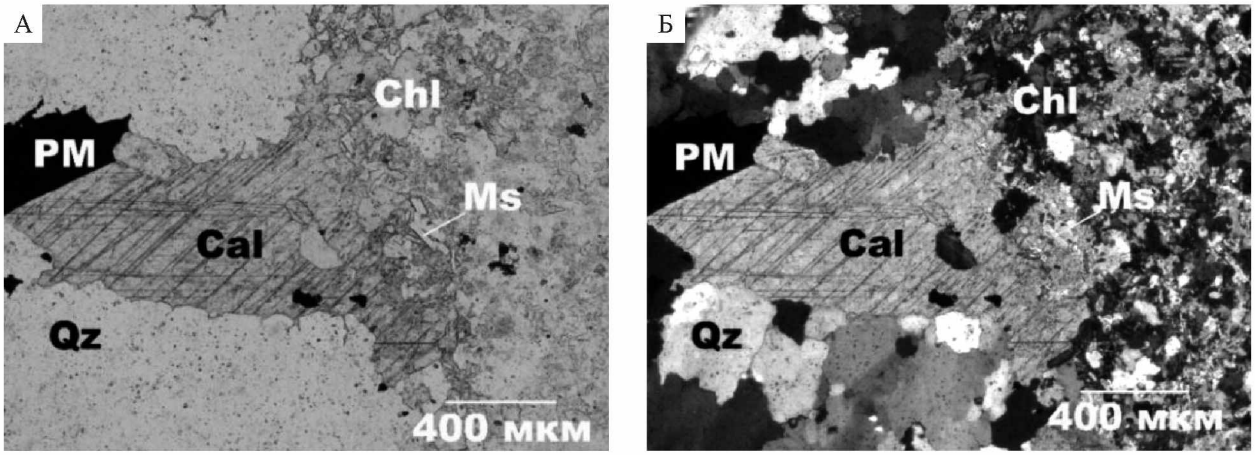


Рис. 2. Микрофотографии фрагмента зоны контакта метапесчаника с кварцевым прожилком в проходящем свете. А – анализатор выключен, Б – анализатор включен. Qz – кварц, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ms – мусковит, PM – рудный минерал

в метапесчанике. Рудные минералы представлены в основном халькопиритом и борнитом, в подчинённом количестве – халькозином, ковеллином, сфалеритом и галенитом.

Халькопирит и борнит заполняют интерстиции нерудных минералов и трещины в кварцевых жилах и находятся в тесном срастании друг с другом. Также халькопирит образует тонкую ламеллярную решётку в борните и эмульсионную вкрапленность в сфалерите (рис. 3 В). Иногда вокруг зёрен халькопирита и борнита, а также по зонам деформации наблюдается тонкая ковеллиновая кайма (рис. 3 А). У борнита помимо ковеллиновых кайм прослеживаются халькозиновые каймы (рис. 3 Б). Редко в борните визуализируются включения галенита. Зачастую внутри выделений халькопирита и борнита присутствуют обособления породообразующих минералов (рис. 3 Г).

Описанные выше структурные взаимоотношения и формы выделения минералов руды позволяют предположить, что при ее измельчении будут образовываться различные по качеству сростки рудных минералов с породообразующими, а достичь селективного раскрытия рудных минералов можно только при проведении операций тонкого измельчения.

Электронно-микроскопические и микрозондовые исследования подтвердили данные оптико-минералогического анализа, а также позволили оценить элементные составы основных рудных минералов. Как видно из таблицы 1, содержания элементов в халькопирите и борните выдержанны и близки к стехиометрическим показателям. В халькопирите были установлены редкие включения молибденита размером около 3 мкм.

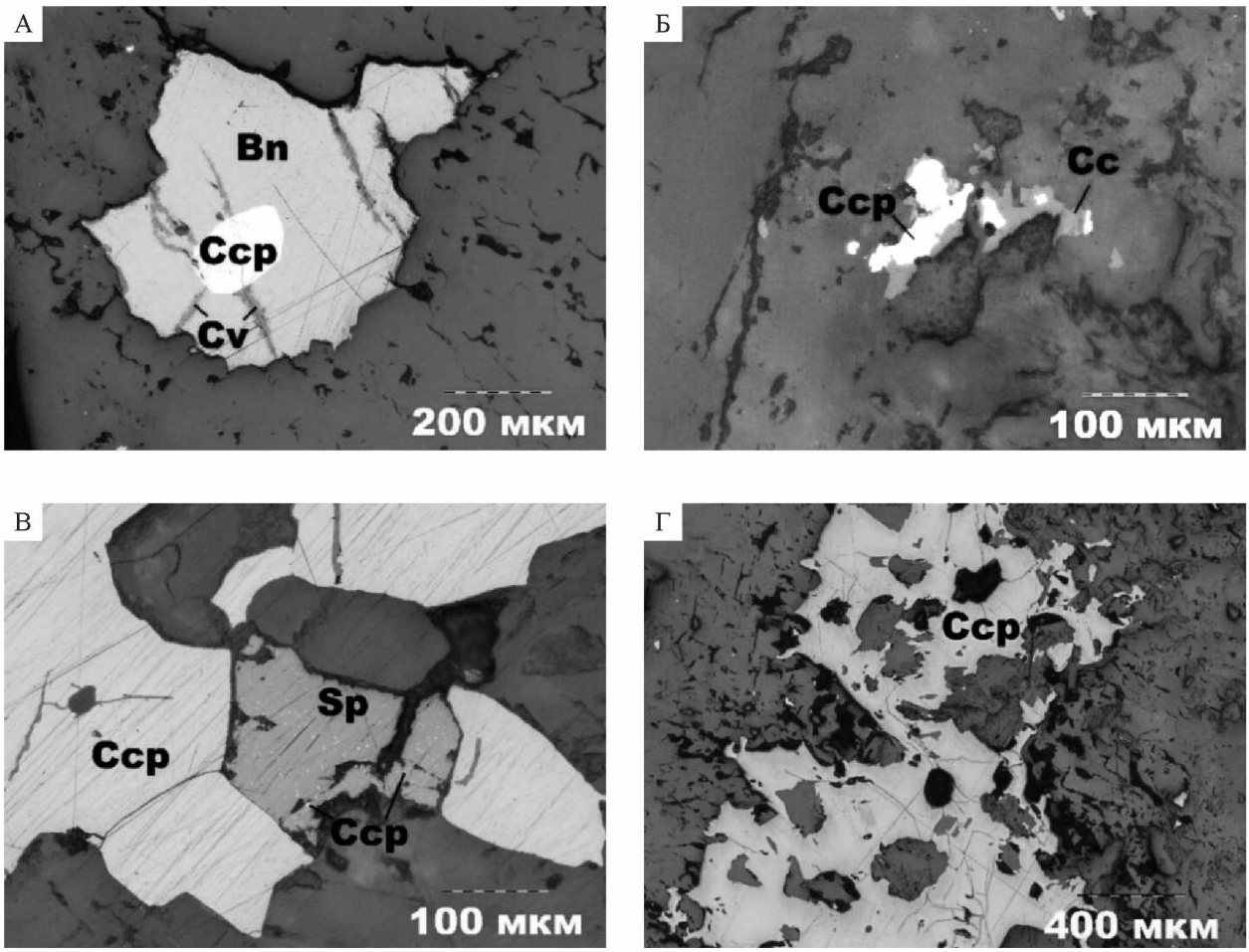


Рис. 3. Микрофотографии выделений рудных минералов. Отражённый свет, анализатор выключен. А – развитие халькозина по халькопириту, Б – срастания борнита с халькопиритом и ковеллином, В – обособления породообразующих минералов в халькопирите, Г – эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите. Bn – борнит, Ccp – халькопирит, Cv – ковеллин, Cc – халькозин, Sp – сфалерит

Таблица 1

Элементный состав борнита и халькопирита, мас. %

№ измерения	Cu	Fe	S	Сумма	Формула
Борнит					
1	61.90	11.06	25.70	98.66	$Cu_{4.86}Fe_{0.99}S_4$
2	62.21	11.02	25.60	98.83	$Cu_{4.90}Fe_{0.99}S_4$
3	61.41	10.59	25.72	97.72	$Cu_{4.82}Fe_{0.95}S_4$
4	61.62	10.74	25.67	98.03	$Cu_{4.84}Fe_{0.96}S_4$
5	59.39	12.68	26.85	98.92	$Cu_{4.46}Fe_{1.08}S_4$
6	60.39	12.53	26.51	99.43	$Cu_{4.60}Fe_{1.09}S_4$
Халькопирит					
7	33.97	30.23	34.71	98.91	$Cu_{0.99}Fe_{1.00}S_2$
8	34.11	30.56	33.86	98.53	$Cu_{1.02}Fe_{1.04}S_2$
9	33.75	29.81	34.25	97.81	$Cu_{0.99}Fe_{1.00}S_2$
10	33.84	29.80	34.15	97.79	$Cu_{1.00}Fe_{1.00}S_2$
11	33.49	29.30	33.43	96.22	$Cu_{1.01}Fe_{1.01}S_2$

Оптико-минералогический анализ дроблёной руды показал, что породообразующие минералы (кварц, полевые шпаты, карбонаты и слюды) слагают основную массу пробы – 90.9%. Преобладающими рудными минералами являются халькопирит (2.4%) и борнит (5.5%), в подчинённом количестве находятся галенит, сфалерит и арсенопирит. Вторичные минералы меди представлены халькозином, ковеллином и малахитом. В единичных зёрнах отмечено присутствие самородного золота. При проведении минералогических исследований минералы серебра в изучаемой навеске не обнаружены. Однако рациональный (фазовый) анализ руды на золото и серебро показал, что содержание золота в пробе составляет 0.27 г/т, а содержание серебра – 111.62 г/т. Серебро в данной руде может содержаться форме сульфосолей или в виде примеси в самородном золоте и в сульфидных минералах. Для диагностики форм нахождения серебра необходимо более детальное изучение руды.

После измельчения руды также была проведена классификация сростков основных минералов меди (халькопирита и борнита) открытого типа – разделение выполнялось путём визуального определения их срастаний между собой и с породообразующими минералами.

Сростковый анализ показал (таблица 2), что основная масса сульфидов меди находится в срастании с породообразующими минералами. Чаще всего сростки сульфидов меди представляют собой полиминеральные срастания со слюда-полевошпат-кварцевыми агрегатами. В меньшей количестве обнаружены биминеральные сростки с кварцем, слюдами и малахитом. Сростки рудных минералов (халькопирита и борнита) с породообразующими, в которых доля последних в зерне составляет более 80% распределяются в материал лёгкой фракции ($\rho < 2.89$%). Такого типа срастания будут извлекаться в хвостовую часть при проведении операций гравитационного обогащения.

Таблица 2

Сростковый анализ минералов меди

Класс крупности, мм	Свободные зёрна, % отн		Типы сростков, % отн.									
	Ccp	Bn	Ccp+ Qz	Ccp+ агр.	Ccp+ Bn+агр.	Ccp+ Bn+Qz	Ccp+ слюда	Bn+ агр.	Ccp+ Bn	Bn+ Qz	Bn+ Mlc	Итого
–2+1	0.2	–	–	16.9	8.0	–	–	74.8	–	–	–	100
–1+0.5	2.3	–	–	6.6	7.9	0.4	0.2	82.7	–	–	–	100
–0.5+0.25	2.6	1.6	0.3	–	2.7	–	–	91.4	0.5	0.6	0.2	100
–0.25+0.125	3.1	2.7	1.4	–	2.6	0.5	–	81.9	3.3	4.5	–	100
–0.125+0.071	9.6	21.1	1.0	–	0.7	0.3	–	61.0	0.7	5.5	–	100
–0.071+0.040	17.4	31.1	0.9	–	–	–	–	49.6	–	1.0	–	100

Примечание: Ccp – халькопирит; Bn – борнит; Qz – кварц; Mlc – малахит; агр. – слюда-полевошпат-кварцевые агрегаты.

Анализ распределения рудных минералов (борнита и халькопирита) пробы по классам крупности показал (рис. 4), что сульфиды меди в основном распределяются в материал крупностью от 2 до 0.125 мм. Однако в этом диапазоне крупности основная масса сульфидов меди находится в виде сростков с породообразующими минералами. Такого вида срастания в зависимости от качества будут распределяться в различные продукты при проведении гравитационного обогащения:

– Сростки, относящиеся к богатому и рядовому типам, преимущественно будут распределяться в материал тяжёлой фракции, что может

привести к разубоживанию получаемого концентрата при проведении операций гравитационного обогащения;

– Сростки, относящиеся к бедному типу и включениям, в основном сосредоточатся в материале лёгкой фракции – это понесёт за собой потерю ценных компонентов с хвостами гравитации.

Этот факт необходимо учесть при подборе технологической схемы обогащения исследуемого материала.

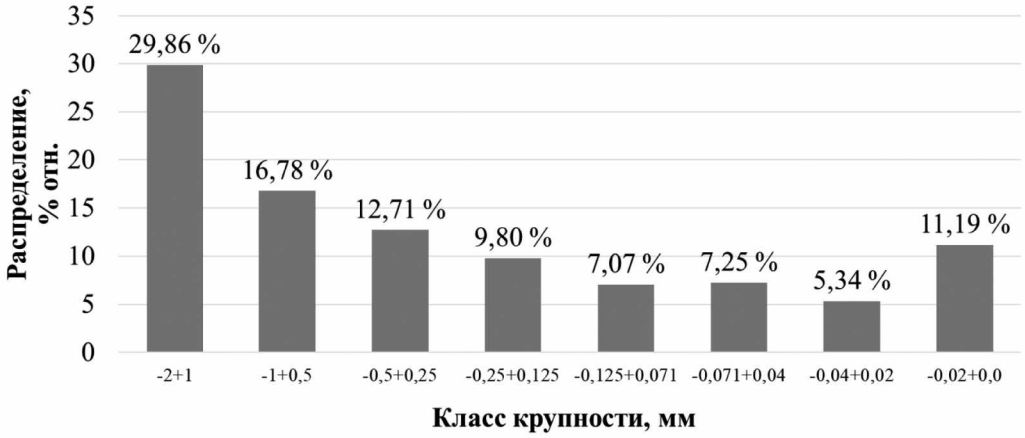


Рис. 4. Диаграмма суммарного распределения сульфидов меди по классам крупности

Заключение

Данные, полученные при проведении оптико-минералогических исследований. позволили оценить минералого-технологические характеристики руд медистых песчаников:

– исследуемые руды по содержанию меди относятся к типу весьма богатых комплексных сульфидных руд и являются сложными для обогащения в связи с поликомпонентным минеральным и сложным морфоструктурным составами;

– структурные взаимоотношения и формы выделений минералов руды определяют тот факт, что при проведении операций измельчения руды будут образовываться различные по качеству сростки рудных минералов с породообразующими;

– по данным анализа качества сростков сульфидов меди с породообразующими минералами спрогнозировано их распределение по продуктам обогащения.

Полученные результаты исследований помогли отрегулировать режимы рудоподготовки и обогатительных процессов, спрогнозировать распределение минералов по продуктам обогащения и обосновать причины неизбежных потерь, что в свою очередь, позволило инженерам-технологам разработать оптимальную схему обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания НСОММИ № 31. Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ. М.: ВИМС, 1990.

2. Методические рекомендации НСОММИ № 162. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб. М.: ВИМС, 2012.

3. Методические рекомендации НСОММИ № 194. Минераграфическое изучение руд. М.: ВИМС, 2018.

4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. М.: ФГУ ГКЗ, 2007.

5. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад / гл. ред. Петров Е. И. Тетенькин Д. Д. Государственные доклады – Минприроды России URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/. Дата обращения: 31.10.2022.

6. Смольяков А. Р. Раскрытие минералов при измельчении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горная книга. М., 2007. № 8. С. 224–234.

DOI: 10.17076/TM15_56

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА КВАРЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ, РАЗРАБОТАННАЯ ООО «ПЛАЗЛЭЙ»

Гоптарь А. И.[1], Костромин М. В.[2], Заярный А. А.[1], Воробьев В. В.[1]

[1] ООО «ПЛАЗЛЭЙ», Зеленоград

[2] Забайкальский государственный университет, Чита

В последнее время потребители постоянно ужесточают требования к качеству кварцевых концентратов, поэтому перед производителями поставлена задача получения кварцевых концентратов с повышенным качеством.

Разработанная ООО «ПЛАЗЛЭЙ» технология предназначена для селективного измельчения кварцевого сырья с последующим выделением в хвосты обогащения вмещающих минеральных частиц из кварцевых концентратов, удаления минеральных частиц в виде плёнок с поверхности зёрен кварцевой крупки, газо-жидких включений из зерен кварца, химических элементов как вредных примесей из дислокационных каналов и поверхности кварца. До настоящего времени на отечественных горно-обогатительных комбинатах процессы глубокого обогащения по удалению структурных примесей из кварцевых концентратов не применялись и считались невозможными из-за отсутствия технических решений [4].

Мировым лидером получения высокочистого кварца (ВЧК) является компания Unimin Corporation/Sibelco (США). Типовой химический анализ основных сортов ВЧК данной компании представлен в таблице 1.

Таблица 1

Содержание элементов-примесей в кварцевых продуктах компании Unimin Corporation, ppm [5]

Эл.	IOTA стандарт	IOTA для ламповых труб	IOTA тигельный	IOTA-4	IOTA-6	IOTA-8
Al	16.2	32.9	17.2	8.0	8.0	7.0
Ca	0.5	4.6	0.5	0.6	0.6	0.5
Fe	0.23	3.1	0.7	0.3	0.15	<0.03
Li	0.9	–	0.7	0.15	0.15	<0.02
Na	0.9	5.9	1.0	0.9	0.08	0.03
K	0.6	5.8	0.8	0.35	0.07	<0.04
Co	<0.05	–	<0.05	–	–	–
Cu	<0.05	–	<0.05	<0.05	<0.05	0.002
Ge	0.9	–	1.0	–	–	–
Mg	<0.05	0.1	0.1	<0.05	<0.05	<0.02
Mn	<0.05	–	0.1	<0.05	<0.05	<0.02
Ni	<0.05	–	0.08	<0.05	<0.05	<0.02
P	0.1	–	0.08	0.05	0.05	0.05
Sr	<0.05	–	<0.05	–	–	–
B	0.08	–	–	0.04	0.04	<0.04
Ti	1.30	–	1.1	1.4	1.4	1.2
V	<0.05	–	<0.05	–	–	–
Zn	0.10	–	<0.05	–	–	–
Zr	1.30	–	0.8	<0.1	<0.1	<0.1
∑	23.51	52.4	24.46	12.14	10.89	9.075

Сорт IOTA-Стандарт содержит 16 ppm Al. Из данного сорта сверхчистого кварца возможно получать плавленое кварцевое стекло с низким коэффициентном термического расширения. Такое стекло используется в высокотемпературных колбах для ртутных и галогеновых ламп, а также в полупроводниковых кварцевых изделиях.

Сорт IOTA-4 является основным сырьём для полупроводниковой промышленности. Из данного кварца получают кварцевое стекло с высокой вязкостью.

Сорт IOTA-6 применяется для производства стекла, используемого в низкощелочных кварцевых изделиях, диффузионных трубах. Низкий уровень щелочей значительно способствует повышению качества кварцевого стекла.

Сорт IOTA-8 впервые на рынке появился в конце 1999 года и является самым высоким в серии с общим содержанием K, Li и Na сниженным до 90 ppb, и важнейшими переходными металлами <50 ppb. Эта высшая степень чистоты в альфа-кварцевом порошке ведёт к долгому сроку службы изделий из него, которые могут функционировать при высоких температурах с минимальным риском деформации [2]. Данный сорт кварцевой крупки применяется для изготовления тиглей большого диаметра.

Российский производитель обогащённого кварца ООО «Русский кварц» выпускает кварцевые концентраты в соответствии с ISO 9001:2015. Характеристики самого чистого концентрата RQ-1K, только мелкой фракции 75–180 мкм, пригодны не для всех способов наплава кварцевого стекла, полученного после финишной операции обогащения – высокотемпературного хлорирования, представлены в таблице 2 [6].

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в кварцевом концентрате ООО «Русский кварц», ppm

ВЧК	Al	Ca	Fe	K	Li	Mg	Na	Ti
RQ-1K	5.0	0.3	0.2	0.1	0.24	0.1	0.1	3.0

Качество отечественных кварцевых концентратов значительно уступает качеству кварцевых концентратов зарубежных производителей по плавочным свойствам и температуре вязкости из-за низкого содержания Al.

На основе изучения и анализа литературных источников, результатов научных исследований и производственного опыта российских компаний, включая проведение собственных тестовых и экспериментальных испытаний, в ООО «ПЛАЗЛЭЙ» разработана технологическая схема получения кварцевых концентратов повышенного качества. С использованием разработанной схемы осуществлен монтаж опытно-промышленной линии (ОПЛ ООО «ПЛАЗЛЭЙ») для определения оптимальных технологических параметров эксплуатации технологического оборудования, с последующей разработкой рабочего проекта и строительством обогатительной фабрики.

В промышленных условиях, для дробления кварцевого сырья планируется применять двухстадийное непрерывное электроимпульсное дробление, основанное на принципе эффекта Юткина (электрогидродинамического удара). При данном способе дробления и измельчения происходит дезинтеграция вмещающих горных пород по дислокациям их срастаний с кварцем, а обогащаемый материал получает минимальные загрязнения от рабочих поверхностей оборудования, по сравнению с классическими способами разрушения. В совокупности проведения электроимпульсного дробления первой стадии, классификации, фотосепарации, электроимпульсного дробления второй стадии, мокрой магнитной сепарации, обесшламливания и обезвоживания, на выходе получается частично обогащённая рабочая фракция кварцевой крупки крупностью +0.075–0.4 мм. Применение в технологической схеме фотосепарации позволяет исключить трудоёмкую операцию ручной рудосортировки исходного кускового кварца. В таблице 3 представлена динамика содержания примесей в кварцевой крупке до и после электроимпульсного дробления жильного кварца месторождения Губерлинка.

Для удаления с поверхности кварцевой крупки ожелезнёной минеральной пленки и остаточных тонкодисперсных сростков вмещающих минералов, кварцевый материал поступает на оттирку в растворе соляной кислоты. Далее кислотный раствор удаляется и отправляется на регенерацию. Кварцевую крупку отмывают до нейтральной среды и разбивают при помощи вибрационного сита на два подкласса для дальнейшего обогащения.

Выделение лёгких (полевой шпал, слюда и т.д.) и тяжёлых минералов относительно кварца осуществляется с помощью концентрационных столов шламового исполнения. Для каждого типа концентрационных столов задаются свои технологические параметры работы [3].

После проведения процесса гравитации обогащённые кварцевые продукты классифицируются на дополнительные подклассы. Классифицированные кварцевые продукты поступают на ультразвуковое обогащение. Ультразвуковая обработка даёт возможность очистить от плёнок гидроокислов железа и остаточных шламовых покрытий кварцевых зерен от минералов (турмалина, полевого шпата) [1], а также удалить остатки свободных зёрен сопутствующих минералов. Пройдя стадию ультразвукового обогащения, кварцевые продукты обесшламливаются и обезвоживаются.

Таблица 3

Содержание элементов-примесей в крупке жильного кварца месторождения Губерлинка до и после электроимпульсного дробления, ppm

Элемент	Исходная крупка < 150 мм	Обогащенная крупка 80–250 мкм
Железо	1100	8.8
Титан	136	4.1
Цирконий	3	<0.01
Марганец	6.2	0.09
Алюминий	610	16
Медь	3.1	0.1
Цинк	4	0.18
Бор	0.63	0.25
Никель	1.5	0.035
Хром	1.5	0.034
Кобальт	1.2	0.021
Кальций	42	21
Стронций	1.5	0.28
Барий	3.5	0.53
Магний	38	0.6
Натрий	18	5.1
Калий	95	3.1
Литий	0.59	0.26
Германий	0.5	0.51
Фосфор	16	0.38

Следующая операция технологической цепочки состоит в удалении остаточных тонкодисперсных вредных примесей. Главным образом, такие раздробленные частички примесей находятся в системах микротрещин. Данный процесс обогащения осуществляется на электрохимической установке, в растворе соляной кислоты. Далее, кварцевые продукты отмываются, обезвоживаются и поступают на сушку.

В зависимости от требований к качеству конечного продукта кварцевая крупка поступает на установку высокотемпературного хлорирования или на установку плазмохимии.

Хлорирование – это технологический процесс нагрева материалов в атмосфере хлорсодержащих газов производится с целью извлечения из кварцевой крупки хлористых солей.

Плазмохимическая технология в ОПЛ ООО «ПЛАЗЛЭЙ» основана на физико-химическом методе и является заключительным этапом получения кварцевых концентратов для наплава прозрачного стекла, применяемого в электронике, оптике, светотехнике и т.д. Обработка кварцевой крупки в плазме осуществляется с использованием технологических газов для удаления с поверхности и из дислокационных каналов остаточных примесей. До применения плазмохимии считалось невозможным удалить из зерна кварца щелочного металла – лития (Li), так как он является компенсатором заряда Al.

В таблице 4 показана динамика изменения содержания элементов-примесей в крупке бразильского горного хрусталя и жильного кварца

Кыштымского ГОКа в результате обработки плазмой при трёх различных технологических режимах расходов технических газов. Особенность горного хрусталя заключается в том, что щелочные металлы, особенно ухудшающие качество кварцевого стекла, находятся в основном в дислокационных каналах кристалла, и не извлекаются традиционными методами в кислотных растворах. В то время как плазмообработка приводит с снижению содержания Li, Na, и K.

Таблица 4

Содержание элементов-примесей в крупке Бразильского горного хрусталя и в жильного кварца Кыштымского ГОКа на разных стадиях обработки плазмой, ppm

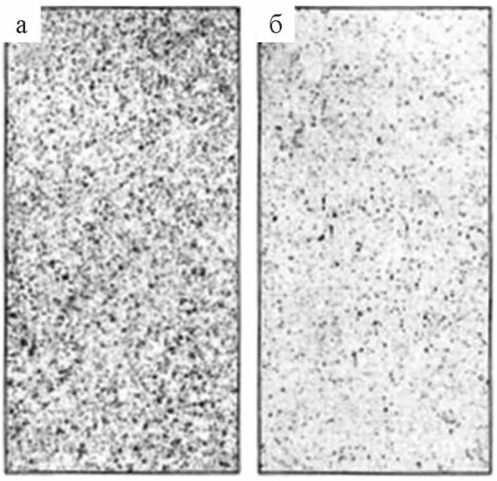
Элемент	Бр.Х исх	Бр.Х № 1	Бр.Х № 2	Бр.Х № 3	К175 об.б исх	К175 № 1 № 1	К175 № 2	К175 № 3
Li	1.0	0.16	0.06	0.035	0.25	<0.01	<0.01	<0.01
Na	3.5	0.6	0.4	0.3	0.9	0.2	0.16	0.2
K	1.4	0.6	0.6	0.5	0.7	0.4	0.5	0.5
Ti	0.47	0.49	0.43	0.43	2.6	2.8	2.8	2.8
Ca	2.2	2.2	2.2	1.3	0.6	0.7	0.54	0.6
Mg	0.19	0.18	0.18	0.16	0.12	0.12	0.12	0.14
Al	9.4	10	10	10	5.5	4.7	4.5	4.6
Fe	2	1.1	1.6	0.93	0.65	0.47	0.7	0.43
Mn	0.04	0.03	0.03	0.028	0.013	0.018	0.013	0.011
B	0.10	0.085	0.076	0.079	0.11	0.10	0.11	0.11
Cu	0.01	<0.01	0.015	0.016	<0.02	<0.01	0.01	<0.01
Ni	0.056	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.03	<0.02
Cr	0.07	0.034	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

Примечание: Бр.Х исх.– Бразильский горный хрусталь исходный и обработанный плазмой в режимах № 1, 2, 3 (Бр. Х № 1, Бр. Х № 2, Бр. Х № 3); К175 об.– обогащённая крупка жильного кварца Кыштымского ГОКа 175 жилы и обработанная плазмой в режимах № 1, 2, 3 (К175 № 1, К175 № 2, К175 № 3).

Опытно-промышленная линия ООО «ПЛАЗЛЭЙ» будет укомплектована трубчатой печью для плавления кварца в атмосфере защитного газа при строго заданном режиме, что позволит контролировать плавочные свойства кварца для получения ВЧК.

На рисунке показаны сканограммы наплавленных блоков кварца. Количество пузырей в плавленом блоке кварца после обработки крупки плазмой в течение 6 минут уменьшилось. Аналогичный результат достигается при традиционной прокалке кварцевой крупки при температуре 1200 °С в течение 6 часов.

Применение в технологии ООО «ПЛАЗЛЭЙ» метода плазмохимии позволит отказаться от традиционного дорогостоящего и экологически неблагоприятного метода обогащения – флотации, который предусматривает строительство хвостохранилища. Низкая себестоимость обогащения кварцевого сырья при использовании разработанной экологически безопасной технологии ООО «ПЛАЗЛЭЙ» в промышленных условиях, позволит минимизировать сроки окупаемости инвестиционных вложений.



Сканограммы плавленых блоков кварца из необработанной (а) и обработанной (б) плазмой крупки

ЛИТЕРАТУРА

1. Акопова К. С. Применение ультразвука при изучении вещественного состава руд и горных пород. Сборник: «Применение ультразвука для интенсификации процессов обогащения и минералогического анализа», вып. 17, М.: ВИМС, 1971.

2. Анализ высокочистого кварца. Компания Дорфнер, Германия, DORFNER Anzaplan GmbH, 2005 г.

3. Богданов О. С. Справочник по обогащению руд. М.: Недра, 1983, 86 с.

4. Исаев В. А. Структурные примеси в кварце. Горный информационно-технологический бюллетень. М.: 2006 г., 21 с.

5. Крылова Г. И., Скобель Л. С., Митрофанов А. А., Балакирев В. Г. Геологические и минералого-геохимические сведения о кварце с торговой маркой IOTA (США, штат Северная Каролина). Возможности поиска его аналогов в России // Уральский геологический журнал. 2003. Т. 4. № 34. С. 81–122.

6. Сертификат качества ООО «Русский кварц» № 18/0101 от 18.05.2018 г.

DOI: 10.17076/TM15_57

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ «КРАСНОБРОДСКАЯ-КОКСОВАЯ»

***Чикишева Т. А.*[1, 2, 3], *Комарова А. Г.*[2, 3], *Прокопьев С. А.*[1, 2], *Прокопьев Е. С.*[1, 2], *Алексеева О. Л.*[1, 2]**

[1] Институт земной коры СО РАН, Иркутск
[2] ООО НПК «Спирит», Иркутск
[3] Иркутский государственный университет, Иркутск

Введение

Угледобывающие предприятия, находящиеся на территории Кузнецкого угольного бассейна, стабильно обеспечивают более половины отечественной угледобычи [4]. В результате активной добычи и переработки угольного сырья на территории Кемеровской области складируются огромные массы отходов углеобогащения, которые уже сейчас занимают тысячи гектаров земли и оказывают колоссальную нагрузку на экосистему [1, 2].

Отходы угледобычи являются техногенными минеральными объектами и характеризуются различными качественными и количественными параметрами, экологическим влиянием на окружающую среду и экономической эффективностью их промышленной переработки. В связи с этим они нуждаются во внедрении технологических решений для их комплексной переработки с наиболее полной утилизацией и минимальным негативным воздействием на окружающую среду [3].

В данной работе представлены результаты минералого-технологических исследований отходов флотации обогатительной фабрики «Краснобродская-Коксовая», выполненных с целью оценки возможности вторичной переработки углеотвалов.

Объект и методы исследования

Углеобогатительная фабрика «Краснобродская-Коксовая» находится на территории Кемеровской области (рис. 1) и перерабатывает сырьё Краснобродского и Новосергеевского полей, относящихся к месторождениям Кузнецкого угольного бассейна. Мощность фабрики оценивается в 3 млн т угля в год.



Рис. 1. Схема расположения ОФ «Краснобродская-Коксовая»

Материалом для исследований послужила углесодержащая технологическая проба массой 1000 кг из отходов флотации крупностью 0–0.5 (1) мм. Петрографическое изучение углей проведено методами оптической микроскопии в аншлиф-брикетах, изготовленных из классифицированного материала пробы. Исследования выполнялись с использованием методических рекомендаций НСОММИ № 162 «Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб» с применением бинокулярного стереомикроскопа Микромед МС-2-ZOOM 2CR, сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMH TESCAN (в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН) и поляризационного микроскопа Olympus BX53-F (в научно-учебной лаборатории экспериментальной геологии геологического факультета ИГУ). Рентгенографический анализ выполнялся в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН на дифрактометре ДРОН-3.0. Исследование производилось по межгосударственным стандартам.

Результаты и обсуждение

Гранулометрический анализ исходного сырья показал, что более половины материала пробы распределяется в крупность менее 20 мкм (рис. 2) с показателем зольности сухого топлива 40.5%. Материал более 0,5 мм имеет высокие показатели зольности (74.5–80.8%) с общим выходом 5.43%. Зольность сырья в диапазоне крупности от 0.5 мм до 20 мкм составляет 34.84%, что даёт основание считать этот диапазон крупности продуктивным для обогащения.

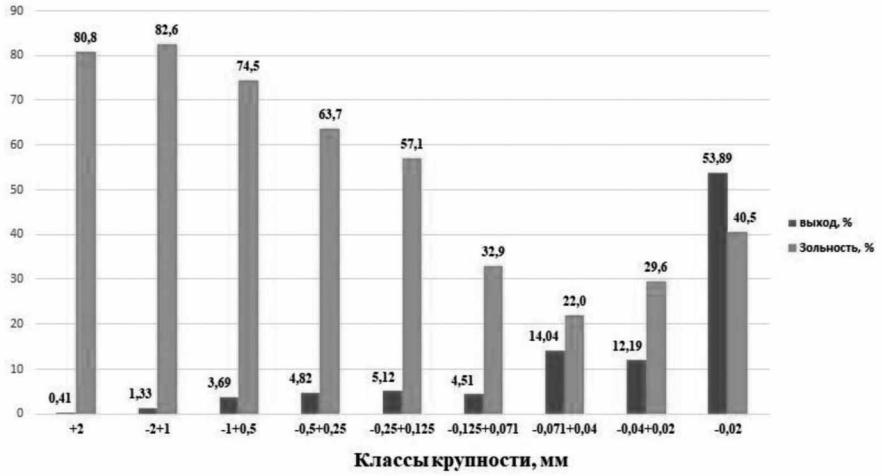


Рис. 2. Гранулометрическая характеристика пробы отходов флотации

Оптико-минералогический анализ углесодержащей пробы показал, что на долю угля приходится 59.8%, а на долю минеральной составляющей – 40.2%. Минеральная составляющая в свою очередь в основном состоит из смешанослойных образований гидрослюд и смектита – 29.52%. В меньшем количестве в ней присутствуют кварц (2.88%), полевые шпаты (0.68%), карбонаты (0.34%), сульфиды (0.03%), магнетит (0.09%) и слюды (0.01%).

С помощью оптических методов исследования было установлено, что зёрна, которые слагают материал пробы, представлены отдельными минералами, минеральными агрегатами, минеритами (минеральные агрегаты с примесью угля до 40%) и обломками угля. При изучении микрокомпонентов по визуальным признакам было определено три группы мацералов (рис. 3) – витринит (телинит, коллинит), липтинит (споринит и кутинит), инертинит (фюзенит и склеротинит), а также минеральные составляющие. Витринит имеет превалирующее значение среди остальных мацеральных компонентов.

Анализ минеритов показал, что они в своем составе имеют различные соотношения углистой (органической) и минеральной составляющих. По данным минералогического анализа минеральная матрица минеритов по своему составу преимущественно карбонатно-глинистая и глинисто-карбонатная, реже карбонатная и глинистая. Также в составе минеритов обнаружены редкие включения сульфидов, гётита, рутила, циркона, ксенотима, монацита, барита, вольфрамита и выделения самородного серебра и интерметаллидов Cu и Zn.

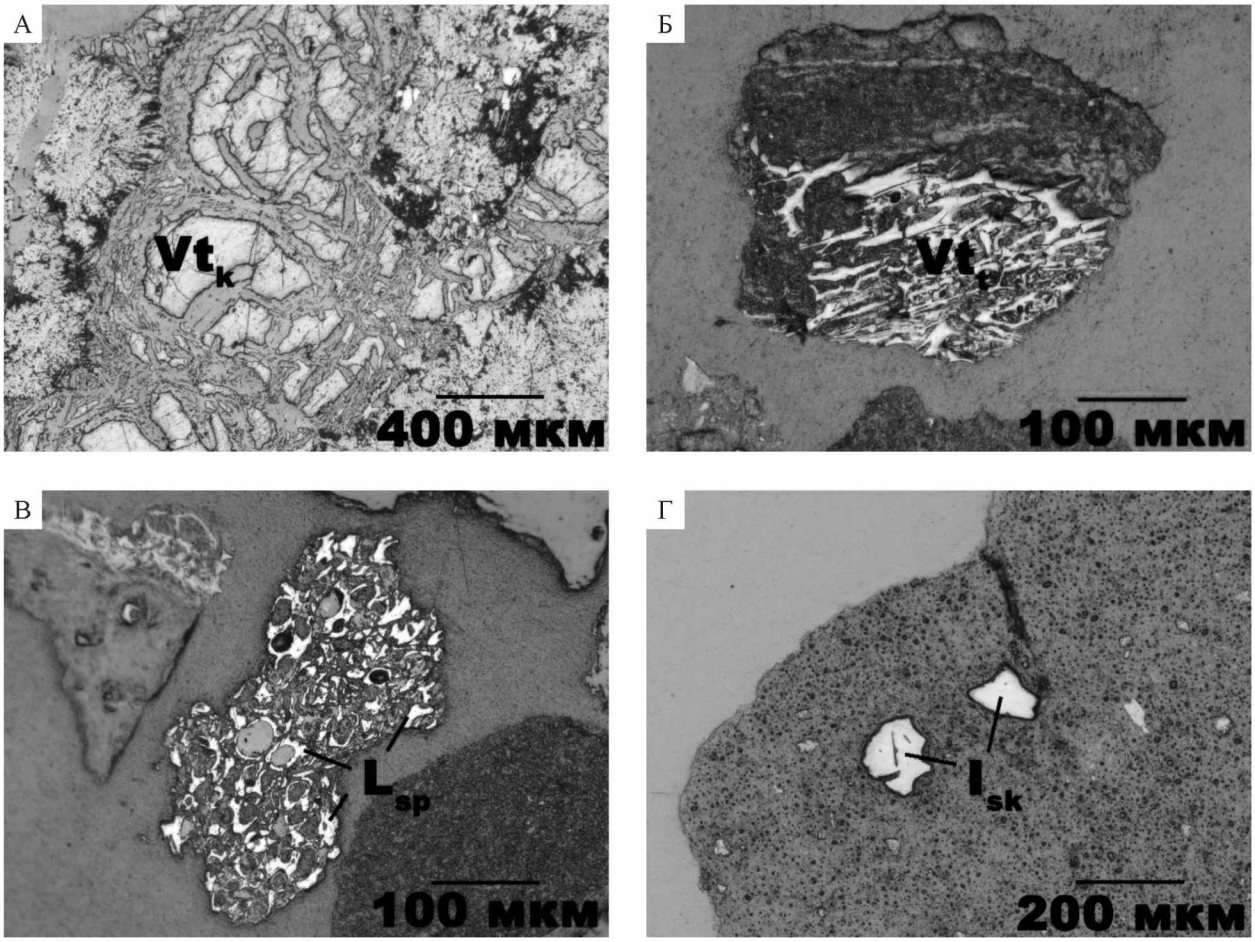


Рис. 3. Микрофотографии фрагментов аншлиф-брикетов. А – Vt_k – коллинит, Б – Vt_t – телинит, В – L_{sp} – споринит, Г – I_{sk} – склеротинит. Отраженный свет, анализатор выключен

При проведении сравнительного анализа соотношения обломков чистого угля, минеральных агрегатов и минеритов установлено, что материал крупностью более 0.25 мм преимущественно сложен минеритами и минеральными агрегатами (рис. 4). С уменьшением классов крупности содержание угольных компонентов увеличивается.

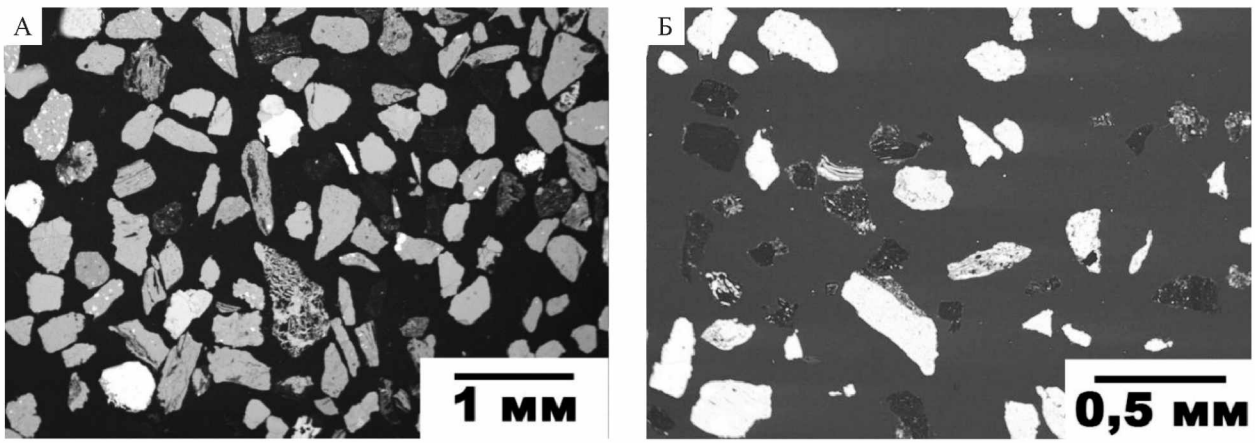


Рис. 4. Микрофотографии фрагментов аншлиф-брикетов. А – класс крупности –0.5+0.25 мм; Б – класс крупности –0.25+0.125 мм; Электронно-микроскопические изображения в обратно рассеянных электронах. Минеральная матрица – белая и светло-серая; углистое вещество – чёрное

Выводы

Исследования показали, что большая часть изучаемого материала по критериям, принятым для угольного сырья, имеет шламовую крупность. Более чем 50 % отходов флотации фабрики «Краснобродская-Коксовая» представлено материалом крупностью менее 20 мкм с распределением угля в этот класс 53.6 % и высоким содержанием глинистых минеральных фаз. Высокие показатели зольности в материале крупностью более 0.5 мм связаны с присутствием здесь угля в составе агрегатов глинисто-карбонатного состава. На данном этапе можно заключить, что наиболее продуктивным по всем показателям с точки зрения его обогатимости материалом в отходах флотации можно считать материал крупностью –0.5+0.02 мм. Рекомендуется вывести из процесса высокозольный материал крупностью более 0.5 мм, чтобы избежать разубоживания получаемых концентратов, а также труднообогатимый класс менее 20 мкм.

Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов А. Н., Манаков Ю. А. Закономерности восстановления растительного покрова на отвалах Кузбасса // Сибирский лесной журнал. 2016. № 2. С. 51–58.

2. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Васильева А. Д., Мухина А. С. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 8. С. 164–178.

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

4. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: государственный доклад / гл.ред. Тетенькин Д. Д., Петров Е. И. Книга_ГД-2021_web_2023.01.18_8.pdf (vims-geo.ru). (Дата обращения: 30.08.2023).

DOI: 10.17076/TM15_58

ЦЕННЫЕ ПРИМЕСИ В ЗОЛАХ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ ЭКИБАСТУЗСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ

Кунилова И. В., Лавриненко А. А.

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва

Введение

Угли Экибастузского угольного бассейна (Казахстан) относятся к каменным, которые обладают высокой теплотой сгорания. Данные угли принадлежат к углям первой группы взрываемости, малоопасны и не самовоспламеняются. Благодаря этим достоинствам они широко используются как энергетическое топливо на теплоэлектростанциях. Экибастузский энергетический уголь – проектное топливо восьми крупных электростанций России в Омской, Челябинской, Свердловской областях. Рефтинская городская районная электростанция (ГРЭС) Свердловской области является самой крупной российской электростанцией, работающей на твердом топливе. На Рефтинской ГРЭС

образуется 4.5 млн т золы в год, а утилизируется только 465 тыс. т/год, т.е. порядка 10% [3]. Также на экибастузском угле работают местные теплоэлектростанции Казахстана, при этом утилизации подвергаются 8% отходов сжигания (менее 1.9 млн т) [2].

Угли Экибастузского угольного бассейна являются высокозольными (в среднем 45.0%) и труднообогатимыми. После пылеугольного сжигания в летучую золу, иначе называемую золой уноса, переходят и, в ряде случаев, концентрируются такие ценные элементы, как редкие и благородные металлы [9], что делает важным изучение состава золы с точки зрения перспективности извлечения этих элементов.

При строительстве и реконструкции теплоэлектростанций, работающих на угле, предпочтительным является перспективный для эффективной утилизации раздельный отбор и хранение сухой золы уноса и золошлаковых отходов. Цель исследований – анализ элементного и гранулометрического составов образцов сухой золы электрофильтров, полученной при сжигании экибастузских углей, для оценки эффективности выделения ценных примесей.

Материалы и методы исследования

Объектом настоящего исследования являлась проба золы сухого отбора и складирования Рефтинской ГРЭС. Исследование элементного состава золы проводилось методами энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа на мини-лаборатории Olympus X-5000, имеющей кремниевый дрейфовый детектор (SDD), а также, в качестве источника возбуждения, рентгеновскую трубку мощностью 10 Вт, с регулируемым напряжением до 50 кВ, максимальным током 200 мкА, разрешением 165 эВ, с танталовым анодом, обеспечивающим повышенную чувствительность к тяжелым, в т.ч. редкоземельным, элементам (лаборатория ЭКОН ИПКОН РАН). Содержание углерода определялось по зольности методом сжигания на термогравиметрическом анализаторе TGA-701 LECO.

Гранулометрический состав золы определялся методами лазерной дифракции на анализаторе Analizette 22 Fritsch с ультразвуковой подготовкой и мокрого рассева на ситах для анализа распределения элементов по классам крупности.

Результаты и их обсуждение

Исследуемая зола представляет собой высокодисперсный материал, что связано с пылевидным способом сжигания топлива и улавливанием мелких частиц золы в электрофильтрах. Методом лазерной дифракции установлено, что среднеобъемный размер частиц золы в образце составляет 16 мкм. Крупность частиц находится в диапазоне от нескольких мкм до 600 мкм. По данным ситового анализа, основная фракция исследуемой золы является классом крупности менее 0.02 мм (выход 41%), также значительно содержание класса +0.071 мм (выход 28%).

Анализ химического состава исследуемой золы сухого отбора показал (табл. 1), что основными золообразующими компонентами являются оксиды кремния и алюминия, что связано с образованием золы из каменного угля. В подчиненных количествах зола содержит оксиды железа, кальция и других щелочноземельных и щелочных элементов, серы, титана, фосфора. Недожженный углерод также присутствует в золе. Следует отметить его низкое содержание (1.75% в образце) по сравнению с золой Омской ТЭЦ-4 (3.5%) и, тем более, по сравнению с золошлаковыми отходами, например, Каширской ГРЭС (10–15%). При более высоких содержаниях углерода либо требованиях к содержанию углерода в сырье менее 1% для последующего использования в строительных целях целесообразно выделение углеродсодержащей фракции и ее обогащение. Углеродсодержащая фракция может применяться в качестве добавки к топливу.

Таблица 1

Содержание основных компонентов в образце золы, мас. %

Компонент	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	TiO_2	BaO	K_2O	P_2O_5
Содержание, %	57.92	21.30	3.72	2.14	1.29	1.17	0.89	0.47	0.21

Как известно [4], химический состав зол и золошлаковых отходов в целом различных теплоэлектростанций отличается в зависимости от месторождений исходных углей, способов и режимов сжигания, удаления и складирования. В связи с низким содержанием CaO (менее 10%) исследуемая зола относится к кислому типу по ГОСТ 25818-2017. Модуль кислотности

$M_к$= (SiO_2+Al_2O_3) / (CaO+MgO) составляет 31.8 (существенно больше 1), и также указывает на сверхкислый характер золы. Показатель, характеризующий относительное содержание кремнезема в золе – глиноземный модуль – $M_г$=SiO_2/Al_2O_3, для данной пробы золы составляет 2.7, что является типичным. Содержание железа 3.3 % является относительно невысоким. При выделении железосодержащей фракции методом магнитной сепарации ее можно использовать как корректирующую добавку в производстве цемента [4] или как сырье для производства чугуна в бездоменном процессе Ромелт.

К микрокомпонентам золы относятся элементы с содержанием менее 0.1%. В зависимости от содержания и свойств соединений, они могут представлять экологическую опасность в определенной степени и одновременно являться ценными примесями. Неравномерность распределения содержаний микрокомпонентов в углях по площади и глубине пластов месторождения, а также неодинаковые минеральные формы предопределяют неравномерное распределение содержаний и в получаемых в результате сжигания золах. В связи с этим полученные данные по содержаниям микроэлементов являются ориентировочными. Анализ распределения содержаний элементов по классам крупности (табл. 2) показал преимущественное концентрирование ценных микроэлементов в классе крупности –0.02 мм, что коррелирует с повышенным содержанием фосфора, серы, железа и кальция в этом классе и указывает на вероятное нахождение церия, лантана, тантала, галлия и серебра в соединениях с ними (фосфатов и сульфатов кальция, в частности, изоморфные примеси в структуру апатитов и сульфатов кальция). Ванадий концентрируется также преимущественно в классе –20 мкм. Кобальт, напротив, содержится более в классе +0.04 мм. Иттрий распределен равномерно по всем классам крупности.

Значимые коэффициенты корреляции содержаний микроэлементов с основными элементами приведены в табл. 3.

Содержание циркония характеризуется положительной корреляцией с содержанием кремния. Содержания микроэлементов V, Ce, La, Ga и Ag характеризуются положительной корреляцией с содержаниями фосфора, серы и кальция. Содержание Ta характеризуется положительной корреляцией с кальцием и серой. Содержание Nb характеризуется положительной корреляцией с титаном. Корреляционный анализ распределений содержаний элементов по крупности и ранее проведенные электронно-микроскопические

Таблица 2

Распределение содержаний ценных примесных элементов в г/т по классам крупности

№	Класс, мм	Zr	Co	V	Y	Ce	La	Ga	Ta	Nb	Ag
1	+ 0.071	372	**377**	116	46	ND	ND	23	14	20	5.7
2	–0.071 + 0.04	415	**383**	121	57	ND	ND	19	17	15	4.0
3	–0.04 + 0.02	**472**	212	124	55	ND	ND	21	16	19	3.7
4	–0.02	**457**	198	**169**	50	**122**	**104**	**41**	**36**	15	**38**

Примечание: ND – ниже предела обнаружения.

Таблица 3

Значимые коэффициенты корреляции содержаний микроэлементов с основными элементами

Элемент	Zr	Co	V	Ce	La	Ga	Ta	Nb	Ag
Si	0.85								
Al	–0.95	0.99							
Fe									
Ca			0.98	0.95	0.95	0.91	0.96		0.93
Ti								0.93	
K	0.92	–0.91	0.82						
S		–0.88	0.89	0.88	0.88	0.91	0.85		0.87
P			0.83	0.84	0.84	0.90			0.85

исследования показали, что цирконий может находиться в золе в форме циркона $ZrSiO_4$ и примеси в силикатных минералах калия, а лантаноиды – в форме монацита (Ce, La, Nd,..Th)PO_4, галлий и серебро – в виде примесей в сульфатах и фосфатах кальция, тантал – сульфата кальция. Интересным является наличие корреляционной связи кобальта с алюминием. Содержания редкоземельных элементов и циркония в сумме составляют свыше 500 г/т – минимального промышленного содержания для возможности их извлечения [9]. Ранее нами было показано [7] с использованием оптико-микроскопического и электронно-микроскопического анализов, что зола от сжигания углей Экибастузского угольного бассейна характеризуется наличием спекшихся агрегатов частиц различной природы, в т. ч. алюмосиликатных и железных микросфер, углеродных частиц, тонкой вкрапленности данных частиц, а также неравномерностью распределения микроэлементов в золе, что необходимо учитывать при разработке комплексных технологий их попутного извлечения.

Основными перспективными направлениями извлечения ценных примесей являются их попутное извлечение при выделении гравитационных и углеродных концентратов, содержащих благородные металлы [1, 8], а также селективное выделение гидрометаллургическими методами при глубокой переработке золы [5, 6, 10].

Выводы

Анализ содержаний микроэлементов показал перспективность попутного выделения циркония, ванадия, кобальта, церия, лантана и иттрия при глубокой комплексной переработке золы Рефтинской ГРЭС с использованием комбинированных химико-гидрометаллургических процессов. Преимущественное концентрирование галлия и серебра в классе крупности менее 20 мкм позволяет проводить их извлечение после отделения данного класса крупности. Содержания тантала и, особенно, ниобия являются весьма низкими, что, с учетом неравномерности распределения ценных примесных элементов в золе, делает нецелесообразным их извлечение из исследуемой золы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Делицын Л.М., Власов А.С., Рябов Ю.В., Самыгин В.Д., Голубев Ю.Н. Комплексное обогащение и переработка золы угольных электростанций в РФ // IX Конгресс обогатителей стран СНГ. 2013. С. 225–230.

2. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М. и др. Технология переработки золошлаковых отходов Казахстана // Сборник тезисов к научно-практической конференции: «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: Проблемы. Решения. Перспективы развития». С. 82–86.

3. Золотов А. «Переход Рефтинской ГРЭС на российские угли даст эффект не только СУЭК, но и экономике страны». 27 февраля 2023. [Эл. ресурс]: https://peretok.ru/opinion/25942/ (дата обращения 20.06.2023).

4. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2002. 296 с.

5. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Крылов И.О., Хамзина Т.А. Способы повышения эффективности выщелачивания золы Рефтинской ГРЭС // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья. Материалы Международной конференции (Плаксинские чтения – 2023). М.: Спутник+, 2023. С. 422–425.

6. Лавриненко А.А., Кунилова И.В., Сыса П.А. Исследования процессов извлечения ценных компонентов из золы от сжигания каменных углей: Материалы Международной конференции «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения (Плаксинские чтения – 2022)», Владивосток, 4–7 октября 2022 г. Владивосток: Изд. Дальневосточного федерального университета, 2022. С. 379–382.

7. 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: 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. С. 85–87.

8. Патент РФ № 2588521 B03B9, 27.06.2016. Способ комплексной переработки золошлаковых отходов (варианты) // Патент России № 2588521 B03B9, 2015 / Прокопьев С.А., Болотин М.Л.

9. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и переработки углей. М.: Издательство «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. 432 с.

10. Jinhe Pan a.o. Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 284. N 124725.

DOI: 10.17076/TM15_59

КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ УГЛЕДОБЫЧИ: ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ПЕРСПЕКТИВА ПРИМЕНЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННО-МАГНИТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ

Прокопьев Е. С.[1, 2], *Турецкая Н. Ю.*,[1, 2] *Чикишева Т. А.*,[1, 2, 3] *Прокопьев С. А.*[1, 2]

[1] *Институт земной коры СО РАН, Иркутск*
[2] *ООО НПК «Спирит», Иркутск*
[3] *Иркутский государственный университет, Иркутск*

Введение

Угольная отрасль занимает неотъемлемую часть в энергетике страны. Кемеровская область по-прежнему считается основным угледобывающим регионом [2, 3]. На её территории работает большое количество углеобогатительных фабрик во время работы которых в породные, вскрышные, гидроотвалы помимо горючих веществ, которые могут быть использованы в качестве вторичного сырья, попадают минералы, которые несут в себе так же промышленный интерес. Поэтому при выборе технологии обогащения угольных шламов необходимо учитывать минеральный состав угля, поскольку неорганические соединения попадают в породу разными путями, например, обломки породы, которые привносятся в сформировавшиеся пласты угля грунтовыми водами (глина, песок, валуны, галька, полевой штат, биотит, мусковит, апатит, хлорит, магнетит, рутил и другие) или минеральные элементы попадают в породу на стадии ее формирования. Для создания технологии переработки необходимо тщательное изучение их вещественного состава, особенностей строения минеральных агрегатов и выявление форм нахождения потенциально опасных элементов [1, 4]. Полученная информация поможет выявить элементы представляющие промышленный интерес и определится в альтернативной технологии их обогащения. Цель данной работы заключалась в выборе технологии обогащения исходных угольных шламов на основании полученных данных о вещественном составе.

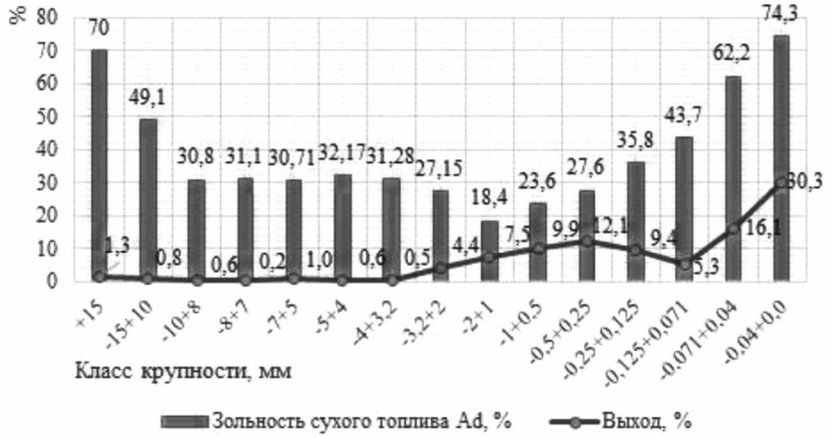
Материалы и методы

Объектом исследований стала технологическая проба, отобранная из отходов углеобогащения. Химический анализ исходной пробы выполнен при помощи атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES) и полного силикатного анализа. Определение зольности сухого топлива исходной материала и продуктов обогащения выполнено методом ускоренного озоления. Оптико-минералогический анализ исходного сырья выполнялся по методическим рекомендациям НСОММИ, с использованием стереомикроскопа Микромед МС-2-ZOOM 2CR.

Результаты и обсуждение

На первом этапе работ был установлен, что в состав исходного сырья входят SiO_2 с содержанием 26.01 %, $Fe_{общ.}$ – 2.38 %, Al_2O_3–10.03 %, TiO – 0.19 %, MnO – 1.55 %, MgO – 0.97 %, Na_2O – 0.11 %, Ba – 0.045 %. Содержание вредных примесей S – 0.95 %, As – 0.0011 %, P – 0.01 %. Из установленных химических элементов промышленный интерес может представлять из себя железо если оно представлено рудным сырьём, а не входит в химический состав породообразующих минералов. В пробе также были обнаружены следы редкоземельных элементов (Y, La, Sc), но интереса в попутном извлечении они не представляют, поскольку их содержание находится на пределе чувствительности.

Второй этап работ заключался в определение гранулометрического состава испытуемого сырья с определение показателей зольности сухого топлива в каждом классе крупности (рис.). Установлено, что материал на 61.1 % представлен углисто-илистой фракцией менее 0.125 мм с показателем зольности сухого топлива равного 63.03 %. Зольность крупнокускового материала более 7 мм равна 53.44 % с выходом 2.9 %. В крупности от 7 до 2 мм зольность равна 28.48 %, выход материала в данный диапазон составляет 6.5 %. Показатель зольности сухого топлива в крупности от 2 до 0.25 мм составляет 23.91 %. Выход материала в данном диапазоне 29.5 %. Представленную крупность от 2 до 0.25 мм возможно рассматривать в качестве исходного питания для технологических испытаний.



Гранулометрический анализ исходного сырья
с показателями сухого топлива по классам крупности

Третий этап работ заключался в определении минерального состава исходного сырья. Последовательность операций по определению минерального состава состояла в гравитационном фракционировании классифицированного материала исходной пробы в бромоформе (удельный вес 2.89 г/см^3) и последующем определении минерального состава пробы. Классы крупности более 2.0 мм изучены без применения гравитационного фракционирования.

При проведении визуального просмотра материала более 2 мм установлено, что он представлен в основной массе каменным углем и обломками песчаников и алевролитов с маломощными прослоями угля. Угли в крупных классах часто содержат включения и прослои терригенного материала, о чём свидетельствуют данные показателей зольности, представленные на рисунке 1. Материал менее 2 мм в основной массе представлен углями – 88.02%. Породообразующие минералы представлены кварцем, плагиоклазом, карбонатами и слюдами, в сумме составляющими 8.07% от всей массы пробы. Также в пробе присутствуют магнетит (0.79%), пирит (0.42%) и халькопирит (0.21%). Минеральный состав исследуемой пробы представлен в таблице 1.

При проведении гравитационного фракционирования установлено, что уголь главным образом концентрируется в легкой фракции. На основании данных оптико-минералогического анализа было подсчитано распределение угля по классам крупности (табл. 2). Установлено, что основная масса угля сосредоточена в материале пробы менее 2 мм, а именно в диапазоне крупности от 0.25 до 2 мм.

Таблица 1

Минеральный состав исходного сырья

Минерал	Содержание, %
Магнетит	0.79
Пирит	0.42
Халькопирит	0.21
Уголь	88.02
Кварц	4.08
Плагиоклаз	2.95
Карбонаты	1.04
Мусковит	Единичные зёрна
Биотит	0.12
Циркон	0.04
Обломки песчаников и алевролитов	2.33
Итого:	100

Полученные данные приводят к выводу, что присутствие такого большого количества высокозольного углисто-илистого шлама повлияет на вязкость пульпы и сегрегационные способности более крупных зерен. В материале более 2 мм обнаружены несгораемые фазы, представленные неорганическим веществом. Поэтому из технологического процесса рекомендуется вывести углисто-илистый материал крупностью менее 0.125 мм и более 2 мм. Поскольку плотность угля по сравнению с породобразующими и рудными минералами значительно ниже, то традиционной технологией получения угольного концентрата будет являться гравитационное обогащение. Что касается присутствия магнетита, данный минерал является ферромагнетиком и его дальнейшее отделение от породообразующих минералов и минералов парамагнетиков может быть осуществлено методом магнитной сепарации.

Таблица 2

Распределение угля по классам крупности

Класс крупности, мм	Содержание в классе, %	Распределение, %
+15	0.33	0.37
–15+10	0.65	0.74
–10+8	0.48	0.55
–8+7	0.19	0.22
–7+5	1.00	1.14
–5+4	0.58	0.66
–4+3.2	0.49	0.56
–3.2+2	4.36	4.95
–2+1	7.45	8.46
–1+0.5	9.80	11.13
–0.5+0.25	11.36	12.91
–0.25+0.125	8.47	9.62
–0.125+0.071	4.52	5.13
–0.071+0.040	13.01	14.78
–0.040+0.0	25.33	28.78
Итого:	88.02	100

Данные, полученные при изучении вещественного состава исходного шлама позволили определить основные положения технологии подготовки пробы к обогащению, уточнить продуктивный класс крупности, определится в выборе метода обогащения сырья.

Четвертый этап работ заключался в проведении технологических испытаний. На материале угольного шлама была выполнена операция грохочения, при помощи которой происходит разделение несгораемой фазы сырья (надрешётный продукт), представленной неорганическими веществами от углесодержащего материала (подрешётный продукт). Далее на подрешётном продукте выполнена операция сгущения при помощи гидроциклона, где происходит разделение рабочего класса крупности (пески гидроциклона) от высокозольного углисто-илистого материала (слив гидроциклона). Дальнейшее обогащение рабочего класса (песков гидроциклона) выполнялось при помощи винтовой сепарации, в ходе которого были получены угольный концентрат и породный продукт. Обогащение породного продукта продолжалось при помощи мокрой магнитной сепарации, в процессе которой магнитная фракция является железосодержащим концентратом, а не магнитная отвальными хвостами. В результате испытаний были получены:

– угольный концентрат с выходом 25.5%; зольность продукта составила 14.4%;

– железосодержащий концентрат с массовой долей железа 64.72%; выход продукта составил 0.7%.

Заключение

Таким образом, результаты исследования отходов углеобогатительной фабрики показывают потенциальную возможность их использования в качестве вторичного минерального сырья. Изучение вещественного состава угольных шламов способствует выбору эффективной технологии их обогащения. Разработана гравитационно-магнитная схема обогащения угольных шламов. Технологическими испытаниями обогатимости угольных шламов показана возможность получения двух товарных продуктов: угольного концентрата, пригодного для использования в энергетической промышленности и железосодержащего концентрата для металлургической промышленности или для применения в качестве утяжелителя в тяжелосредной сепарации на обогатительных фабриках.

Работы выполнены в рамках комплексного научно-технического проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-1192 «Переработка хвостов угольных обогатительных фабрик

с целью получения товарного угольного концентрата» при поддержке комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации № 1144-р от 11 мая 2022 г.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Оценка возможности вовлечения в переработку углесодержащих отходов шламохранилища западносибирского-металлургического комбината // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 446–457.

3. Соловеенко Н. П., Болотин Н. М. Применение технологии винтовой сепарации при переработке угольных шламов // Науки о Земле и недропользование. 2022. Т. 45. № 4. С. 469–480.

4. Михеева М. А., Жиличева А. Н., Штельмах С. И., Прокопьев Е. С., Чикишева Т. А. Ценные и потенциально опасные элементы в углях Иркутского бассейна и продуктах переработки угольных отвалов // Уголь. 2022. № 12. С. 127–131.

DOI: 10.17076/TM15_60

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОРБЕНТОВ

Кочева Л. С.[1], Котова О. Б.[1], Карманов А. П.[2], Богданович Н. И.[3]

[1] Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», Сыктывкар
[2] Институт биологии, ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», Сыктывкар
[3] Северный Арктический федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск

Введение

К важнейшему направлению исследований в современной технологической минералогии следует отнести комплексное и рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов. Одним из возможных вариантов реализации этой задачи может стать разработка новых сорбционных материалов на основе органоминеральных природных и техногенных источников, включая отходы переработки и вторичные продукты различных производств. Создание новых универсальных сорбентов является одной из наиболее наукоемких, актуальных и практически востребованных задач целого ряда научных направлений. Это и поиск сырьевых источников, и разработка новых подходов к их получению, создание теоретических основ, объясняющих механизмы функционирования сорбентов, а также изучение свойств и сфер применения сорбционных материалов, решение ряда экологических вопросов. Достаточно хорошо изученными являются фазовые трансформации золы уноса в технологиях синтеза цеолитов и их сорбционные свойства [2, 8]. Несмотря на перспективы эффективного применения 2D-графеновых структур в геоэкологии и биотехнологии [6, 7], до настоящего времени они не нашли широкого практического использования из-за низкой производительности разработанных к настоящему времени методик их синтеза. Для развития теории и практики синтеза многофункциональных сорбентов полезно изучение альтернативных или комбинированных технологий.

Одним из перспективных подходов к созданию нового класса универсальных сорбентов может стать получение карбонизированных материалов с использованием метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В основе метода СВС лежит реакция

экзотермического взаимодействия веществ, протекающая в автоволновом режиме [4, 11]. Для получения углеродных сорбентов, кроме неорганических сырьевых источников, предложено использовать техногенные отходы растительного происхождения, в частности, гидролизный лигнин, технический крахмал и древесную кору [5, 6]. Перспективным сырьем для получения углеродных сорбентов могут стать биомасса чрезвычайно распространенного в настоящее время инвазивного растения борщевика Сосновского, а также другие недревесные растения.

Материал и методы исследования

В данной работе объектами исследования служили карбонизированные образцы адсорбентов на основе стеблей борщевика (заготовлен летом 2020 г. (образцы С-1, С-2 и С-3) и 2019 г. (образец С-4) в окрестностях г. Сыктывкара, Республика Коми). Компонентный состав биомассы борщевика представлен полисахаридами >75 %, лигнином 20–22 %, зольность составляет 3–5 %. Карбонизацию образцов проводили методом СВС при различном соотношении сырье: окислитель (NH_4NO_3). Выход продуктов составил 35–40 %. Рентгенофлуоресцентный анализ образцов проводили на спектрометре Shimadzu XRF-1800 (Япония). Запись проводилась на образце в форме прессованной таблетки, состоящей из исследуемого образца и поливинилового спирта (в качестве связующего) на подложке из борной кислоты. Прессование осуществляли с использованием инструмента Carber 3912. Микрозондирование образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Mira-3M с EDX приставкой Oxford instruments X-max.

Определение характеристик пористой структуры сорбентов проводили методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе удельной поверхности и пористости ASAP 2020 mp (Micromeritics, USA). Образцы адсорбента предварительно дегазировали при 100 °С до остаточного давления $7 \cdot 10^{-4}$ Па с выдерживанием при заданных условиях в течение 2 часов. Далее проводили адсорбцию и десорбцию газа в интервале давлений от 0 до 101.3 кПа. Используя программное обеспечение прибора, по полученным изотермам рассчитывали параметры пористой структуры. Суммарный объём пор V_{Σ}-БЭТ ($см^3/г$) и удельную площадь поверхности УПП-БЭТ ($м^2/г$) определяли методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ). Общую удельную поверхность мезопор $УПП_{мезо}$ ($м^2/г$) вычисляли по методу BJHдес, Broekhoff-de Boer. Объём микропор $V_{микро}$ ($см^3/г$) рассчитывали по методам Дубинина-Радушкевича и Хорвата-Кавазое, объём мезопор $V_{мезо}$ ($см^3/г$) – по методу Баррета-Джойнера-Халенды (BJH) по десорбционной ветви изотермы.

Сорбционные характеристики образцов установлены в отношении высокотоксичных поллютантов неорганической и органической природы – урана-238 и микотоксина Т-2.

Сорбцию-десорбцию урана определяли в статических условиях при комнатной температуре, для чего навески образцов (~1 г) приводили в контакт с растворами нитрата уранила $UO_2(NO_3)_2$ с концентрациями $0.625 \cdot 10^{-6}$ г/мл при pH 6.0. Уран в нитрате был представлен природной смесью изотопов. Гидромодуль 1: 20. Время экспозиции 24 часа. После контакта исследуемые сорбенты отделяли от жидкой фазы фильтрованием. В фильтрате определяли активности радионуклидов, по убыли которых рассчитывали степень сорбции S (%) урана из водных растворов. Способность образцов удерживать сорбированные радионуклиды оценивали методом последовательных вытяжек. Для этого определяли степень десорбции D (%) в дистиллированной воде (D_{H_2O}), в 1 М раствора ацетата аммония ($D_{CH_3COONH_4}$) и в 1 М соляной кислоты (D_{HCl}). Количество прочно сорбированного радионуклида S_F (%) определяли исходя из данных по суммарной десорбции элементов. Уран определяли люминесцентным методом [1, 10]. Интенсивность свечения перлов измеряли на люминесцентном фотометре ЛЮФ-57.

Сорбцию микотоксина Т-2 изучали на препаратах природных лигнинов и продуктов их карбонизации методом СВС. Препараты природных лигнинов выделяли классическим методом Пеппера [9]. Количественное определение микотоксина Т-2 проводили методом тонкослойной хроматографии с биоавтографическим завершением с использованием культуры *Candida pseudotropicalis* [3].

Результаты и обсуждение

Исследуемые образцы представляют собой мелкодисперсные порошки черного цвета. Количество углерода в образцах варьируется в интервале 74.6–81.8 % (по результатам микрозондирования СЭМ). Соотношение углерода и кислорода С/О в образцах находится

в интервале 5.5–6.9. По данным рентгенофлуоресцентного анализа присутствуют примеси: SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, MnO.

Как показали исследования (табл. 1), максимальную величину удельной площади поверхности имеет образец С-1. Величина показателя УПП-БЭТ для этого адсорбента, рассчитанная по методу Брунауэра-Эммета-Теллера, составила 363 $м^2/г$. Общая поверхность формируется, как сумма площадей всех структурных элементов поверхности, поэтому препарат С-1 превосходит остальные образцы и по всем другим основным характеристикам (V_Σ-БЭТ, $УПП_{мезо}$, $V_{мезо}$, $V_{микро}$). Соотнесение этих показателей с показателями сорбции S и S_F свидетельствует о том, что поверхность адсорбентов в данном случае играет важную роль в процессе сорбции урана.

Таблица 1

Характеристики поверхностных свойств образцов

Параметр	С-1	С-2	С-3	С-4
УПП-БЭТ, $м^2/г$	363	221	33	297
V_Σ-БЭТ, $см^3/г$	0.253	0.179	0.044	0.208
$УПП_{мезо}$, $м^2/г$	39.8	26.5	5.9	–
$V_{мезо}$, $см^3/г$	0.071	0.066	0.028	–
$V_{микро}$, $см^3/г$	0.167	0.106	0.014	0.142

Таблица 2

Сорбция–десорбция (%) урана из водной среды образцами углеродных сорбентов, синтезированных методом СВС

Образец	Соотношение сырье: NH_4NO_3	S	D_{H_2O}	$D_{CH_3COONH_4}$	D_{HCl}	S_F
С-1	50:50	76.7	17.6	2.1	10.6	69.7
С-2	60:40	71.9	18.8	2.8	11.1	67.2
С-3	70:30	99.9	36.1	2.7	23.4	37.8
С-4	50:50	57.6	22.3	1.6	14.4	61.7

Изучение процессов сорбции-десорбции урана показало (табл. 2), что все исследуемые образцы обладают достаточно высокими сорбционными характеристиками. Исключением является образец С-3, для которого значительная доля первоначально сорбированного урана вымывается в условиях метода последовательных обработок. Для С-1 показатели десорбции заметно меньше, чем для других образцов, поэтому в конечном итоге он оказался наиболее эффективным среди исследованных препаратов с показателем необратимой адсорбции S_F, достигающим ~70 %.

Как показывает анализ данных, взаимосвязь между сорбционной способностью S_F в отношении урана и удельной площадью поверхности углеродных материалов выражается уравнением S_F=37.6+0.094×(УПП-БЭТ) с линейным парным коэффициентом корреляции R = +0.945. По шкале Чеддока данный результат указывает на наличие весьма тесной взаимосвязи (корреляция достоверна) между площадью поверхности УПП и показателем прочной адсорбции урана S_F.

Таблица 3

Характеристика сорбции–десорбции микотоксина Т-2 образцами природного (L) и карбонизированного (LC) лигнина

Образцы	Характеристики сорбции-десорбции, %		
	S	D	S_F
L	41.2	22.5	32.4
LC	99.2	0.1	99.0

Ранее нами было установлено, что лигнин – один из основных структурных компонентов растительного сырья может служить перспективным адсорбентом микотоксина Т-2 [5, 6]. Микотоксин Т-2 является весьма токсичным соединением, вторичным метаболитом плесневых грибов рода *Fusarium,* обладающим канцерогенным и мутагенным действием. Микотоксины могут накапливаться в зараженных зерновых культурах и распространяться по пищевым цепочкам, что представляет опасность как для сельскохозяйственных животных, так и для человека.

Эксперименты свидетельствуют о том, что карбонизированные образцы также способны практически полностью адсорбировать один из опаснейших загрязнителей пищевых продуктов микотоксин Т-2 в системах, имитирующих условия в желудочно-кишечном тракте млекопитающих. В таблице 3 в качестве примера приведены характеристики сорбции-десорбции микотоксина Т-2 одним из наших объектов исследований – карбонизированным сорбентом,

полученным из лигнина стеблей брусники, и исходным лигнином до карбонизации.

Установлено, что для карбонизированного сорбента при температуре 37 °С и pH 2 (условия желудка) адсорбция этого микотоксина S составляет более 99%. При pH 8 (условия кишечника) десорбция D не превышает 0.1%. В результате S_F (прочная адсорбция) для микотоксина Т-2 составила 99%. То есть процесс карбонизации приводит к тому, что показатель адсорбции S увеличивается более чем в два раза, а показатель прочной адсорбции возрастает в три раза при практически полном отсутствии десорбции поглощенного токсиканта, что свидетельствует о прочном его удерживании. Полученные результаты указывают на перспективность и потенциальную возможность использования углеродных материалов растительного происхождения в качестве энтеросорбентов.

Выводы

Рассмотрена возможность создания многофункциональных углеродных сорбентов на основе природного и техногенного сырья растительного происхождения, обладающих высокой удельной площадью поверхности и выраженной пористостью. Новые материалы, синтезированные карбонизацией природного органоминерального сырья, можно рекомендовать в качестве перспективных адсорбентов радионуклидов и энтеросорбентов микотоксинов.

Исследования проводятся в рамках Государственного задания (НИР) Института геологии (122040600011-5) и Института биологии (№ 122040600024-5) ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Авторы выражают искреннюю благодарность д.х.н. А.П. Возняковскому, к.б.н. Н.Г. Рачковой, д.т.х. А.В. Канарскому и д.в.н. Э.И. Семенову за помощь в проведении экспериментальных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добролюбская Т. С. Аналитическая химия урана. Серия «Аналитическая химия элементов» / Под ред. А.П. Виноградова. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 432 с.

2. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы уноса // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 526–531.

3. Лабораторные исследования в ветеринарии: биохимические и микологические. Под ред. Б.И. Антонова. М.: Агропромиздат, 1991. 287 с.

4. Мержанов А.Г., Мукасьян А.С. Твердопламенное горение. М.: Торус Пресс, 2007. 336 с.

5. Kanarskaya Z.A., Kanarskii A.V., Semenov E.I., Karmanov A. P., Kocheva L. S., Bogdanovich N. I., Romanenko K.A. Structure and properties of lignin as an absorbent for mykotoxin T-2 // Chemistry of Natural Compounds, 2016. Vol. 52. N 6. P. 1073–1077.

6. Karmanov A.P., Voznyakovsky A.P., Kocheva L.S., Rachkova N. G., Bogdanovich N.I. Sorption properties of carbonized biopolymers of plant origin // Carbon Resources Conversion. 2023. Vol. 6. P. 34–42.

7. Karmanov A.P., Voznyakovsky A.P., Kocheva L.S., Rachkova N.G., Demin V. A., Bardanovich N.I. 2D Carbon Nanomaterials as Promising Adsorbents of Uranium // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2021. Vol. 57. N 5. P. 890–898.

8. Kotova O. B., Shabalin I. L., Shushkov D. A., Kocheva L. S. Hydrothermal synthesis of zeolites from coal fly ash // Advances in Applied Ceramics: Structural, Functional and Bioceramics, 2016. Vol. 115. Issue 3. P. 152–157.

9. Pepper J.M., Baylis P.E., Adler E. The isolation and properties of lignin obtained by the acidolysis of spruce and aspen woods in dioxane-water // Can. J. Chem. 1959. Vol. 37 (8). P. 1241–1245.

10. Rachkova N. G., Shuktomova I. I., Taskaev A. I. Influence of acidity and uranyl nitrate concentration on the efficiency of recovery of uranium (VI) from aqueous solutions with hydrolyzed wood lignin // Russ. J. Appl. Chem. 2004. Vol. 77. P. 467–470.

11. Voznyakovskii A.P., Savkin D.I., Kalinin A.V., Shugalei I. V., Krutov S. M., Mazur A.S. Self-propagating high-temperature synthesis as a promising method for the utilization of technical lignins // Russian Journal of General Chemistry. 2016. Vol. 86. P. 3008–3011.

DOI: 10.17076/TM15_61

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССА ОБОГАЩЕНИЯ ПРИРОДНОГО АЛЮМОСИЛИКАТНОГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Щербакова Н. Н., Захаревич А. М., Сержантов В. Г., Вениг С. Б.

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов

Минерал глауконит является сложным калий-содержащим водным алюмосиликатом, относится к группе гидрослюд подкласса слоистых силикатов непостоянного состава. Благодаря высоким катионообменными свойствам, способности избирательного поглощения катионов и долгоживущих радиоизотопов, тяжелых металлов, глауконит широко используется в качестве природного сорбента для очистки воды и почвы.

Глауконитовые пески Белозерского месторождения в Саратовской области являются перспективным сырьем для производства глауконитовых сорбентов различного назначения. Содержание глауконита в песках составляет 41–56 %, присутствуют также гидрослюды, монтмориллонит, хлорит, кварц, кальцит, сидерит, полевой шпат. Компания ООО «ЭкоСорбент» занималась разработкой технологии обогащения глауконитовых песков Белозерского месторождения на основе исследований, проводимых в ЦКП Саратовского университета им. Н. Г. Чернышевского. Для изучения минерального и химического состава глауконитового сырья, структурно-текстурных особенностей использовались рентгеновский дифрактометр ДРОН-3 и сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) TESCAN MIRA II LMU с системой ЭДС микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40. В результате исследований была разработана технология получения концентрата с содержанием глауконита 90–97 %, а также технология получения линейки продуктов: порошков различного фракционного состава и гранулированного глауконита с модифицирующими добавками в зависимости от назначения. Производимые из обогащенных Белоозерских песков глауконитовые материалы – сорбенты могут быть использованы для очистки, умягчения и частичного обессоливания воды, хозбытовых и промышленных стоков. В сфере экологии и природопользования – для восстановления плодородия грунта, загрязненного нефтепродуктами, солями тяжелых металлов, радионуклидами, пестицидами и др., в ветеринарии и медицине в качестве пищевой добавки и носителя лекарственных средств и полезной микрофлоры.

Разработанная технология обогащения сырьевого глауконитового песка включает удаление примесей, измельчение и последующую механическую и химическую активацию глауконита. Гранулирование порошка глауконита обеспечивает механическую прочность полученного сорбента, позволяет сохранить адсорбированные вещества внутри гранул, расширить спектр и повысить технологичность транспортировки, хранения и внесения комплексных глауконитовых удобрений и микрофлоры в почву, пролонгировать срок их действия, или утилизацию отработанного сорбента [1].

Цель настоящей работы – показать пример использования сканирующего электронного микроскопа с системой ЭДС микроанализа при проведении достаточно-необходимых замеров и определений в процессе обогащения глауконитовых песков и получения сорбентов.

Обработка сырьевого песка должна производиться в режимах, позволяющих сохранить свойства глауконита как сорбента. Продуктом обогащения является слабомагнитный природный железооксидный материал (глауконит) крупностью 0.125–0.05 мм с содержанием Fe_2O_3 18–29 вес. %. Обменная емкость глауконита обусловлена наличием нарушенных связей на боковых гранях (до 10–20 % от общей обменной емкости) и незначительным вкладом краевых гидроксильных групп, что формируется в ходе активации. В процессе производства глауконитового концентрата с минимальным содержанием примесей необходимо соблюдение температуры сушки, режимов удаления примесей, диспергировании продукта.

Так, согласно требованиям ТУ 2322-001-69468254-2013 «Обогащенный глауконит» допускается наличие частиц > 0.05 мм не более 0.1%. Гранулирование также требует тщательного контроля технологических процессов, важно состояние оборудования, способного внести нежелательные металлические включения и обеспечить заданный гранулометрический состав.

Качество конечного продукта определяется соблюдением технологического регламента, основой правильной организации текущего контроля производства являются установленные точки отбора проб и выбор аналитического оборудования. Текущий контроль должен при минимальном количестве задействованных приборов и персонала оперативно отражать характеристики обрабатываемого материала и позволять своевременно вносить коррективы в процесс обработки глауконита, для этого успешно используется автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп MIRA 2 LMU (Tescan).

Режимы исследования. Исследования морфологии и химического элементного состава проводились в режиме высокого вакуума порядка 10^{-2} Па. Для морфологии при ускоряющем напряжением 30 кэВ, для химического элементного состава – 20 кэВ. Такие ускоряющие напряжения были выбраны из соображений: 1) получение четкого изображения морфологии и 2) уменьшения затраченного времени при анализе обнаруженных химических элементов с сохранением высокой точности анализа.

Пробоподготовка. Подготовка материала к исследованию начинается с его обезвоживания – образец высушивается любым доступным способом, который не приводит к его повреждению. В нашем случае для сушки используется вакуумная камера с рабочим вакуумом $8 \cdot 10^{-2}$ mbar. После сушки объект закрепляется на предметном столике микроскопа с помощью вакуумной двухсторонней углеродной проводящей липкой ленты (скотч). Если образцы непроводящие, то на них напыляется тонкий проводящий слой, чаще всего используется углерод и золото. В нашем случае использовали золото, так как при напылении золотом получаются более светлые изображения, по сравнению с углеродом, что связано с энергией выхода электрона. Напыление золота происходит в вакууме: в камере создается давления менее 10^{-2} Па, после чего подается рабочий газ (аргон) до установления равновесного состояния внутри камеры. При 50 Па в камере зажигается плазма, которая распыляет золотую мишень, вылетевшие атомы золота осаждаются на поверхность образца. Толщина золотого покрытия контролируется током плазмы и временем напыления. Толщина напыления, как правило, от 5 до 10 нм, что позволяет получать микрофотографии с большим увеличением без собственной визуализации напыленного вещества.

Исследование морфологии. Регистрация вторичных электронов дает высокое пространственное разрешение, так как область их образования лежит близко к поверхности образца. По взаимному расположению светлых и темных участков на изображении при детектировании вторичных электронов можно судить о выступах и впадинах исследуемого объекта. С помощью изображений поверхности во вторичных электронах можно быстро оценить распределения объектов по размерам и форме. Также возможно увидеть наличие пор и примерно оценить их количество.

Наличие «засвеченных» участков на изображениях объясняется топографическим контрастом. Этот тип контраста возникает за счёт влияния рельефа поверхности на отраженные, и вторичные электроны и имеет большое сходство с изображением, формируемым в световом микроскопе, и поэтому интерпретация его во многом аналогична описанию контраста в оптическом микроскопе. На рисунке 1 показан пример СЭМ-исследования зерен глауконитового песка на разных стадиях его обработки.

Интерпретация изображений рельефа поверхности, получаемых с помощью СЭМ, относительно проста и может быть основана на обычных приемах, используемых при анализе оптических микрофотографий. Качество изображений, получаемых с помощью СЭМ выше, чем на оптических фотографиях, т.к. в СЭМ значительно выше глубина резкости, следует отметить краевой эффект при формировании контраста. На острых гранях поверхности возможная более высокая эмиссия электронов с поверхности, чем на гладких участках, и острые грани поверхности выделяются как наиболее светлые участки поверхности. Противоположность им составляют темные участки поверхности, из которых идет низкая эмиссия электронов. Низкая эмиссия возможна из областей поверхности не пропускающих из себя эмитируемые электроны, вследствие неоднородности поверхности, например, значительные углубления или области с неровностями, имеющими тупые углы относительно ровных частей поверхности.

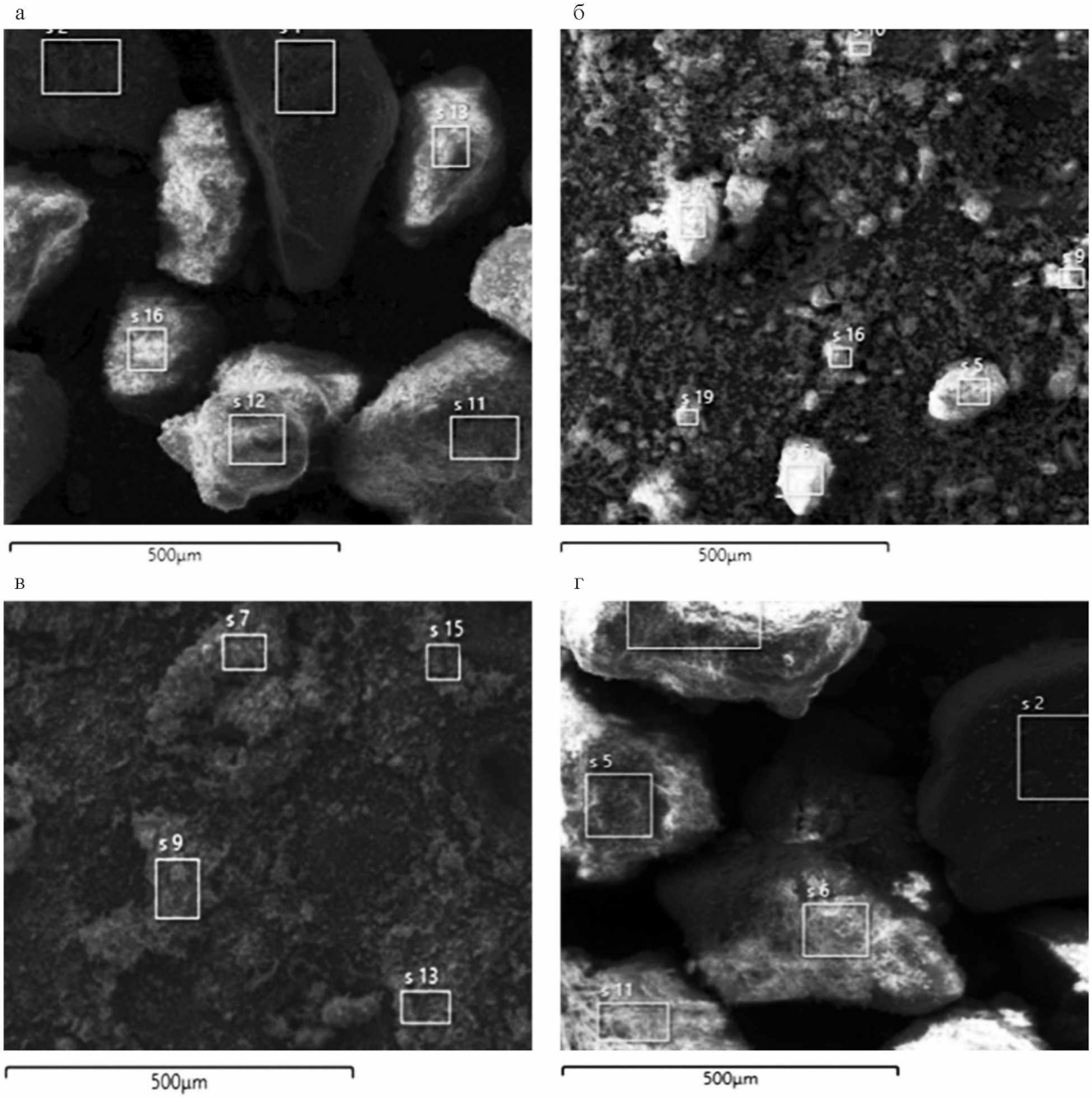


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения зерен глауконитового песка, полученные на разных стадиях его обработки: а – исходный сырьевой глауконитовый песок; б – обогащенный молотый глауконит (0–100 мкм); в-тонкомолотый глауконит (0–10 мкм); г – отходы обогащения. Прямоугольниками показаны участки проведения определений состава

Исследование химического состава. Система рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа AztecLive Advanced Ultim Max 40 позволяет качественно и количественно определять химический элементный состав с выбором исследуемой области – выделены на снимках. Скорость проведения анализа зависит от выбранных условий проведения исследований: в нашем случае это порядка 1 минуты для каждого спектра на выбранном участке, что достаточно для получения надежного результата с высокой точностью.

Определение размеров частиц. При исследовании одной отобранной технологической пробы, можно определить морфологию и состав закрупненных частиц, чтобы выявить технологические причины их нахождения в исследуемом продукте. На рисунке 2 показан пример, иллюстрирующий результаты измерения размеров частиц исходного сырьевого глауконитового песка. Далее данные измерений сводятся в таблицу, проводится статистический анализ.

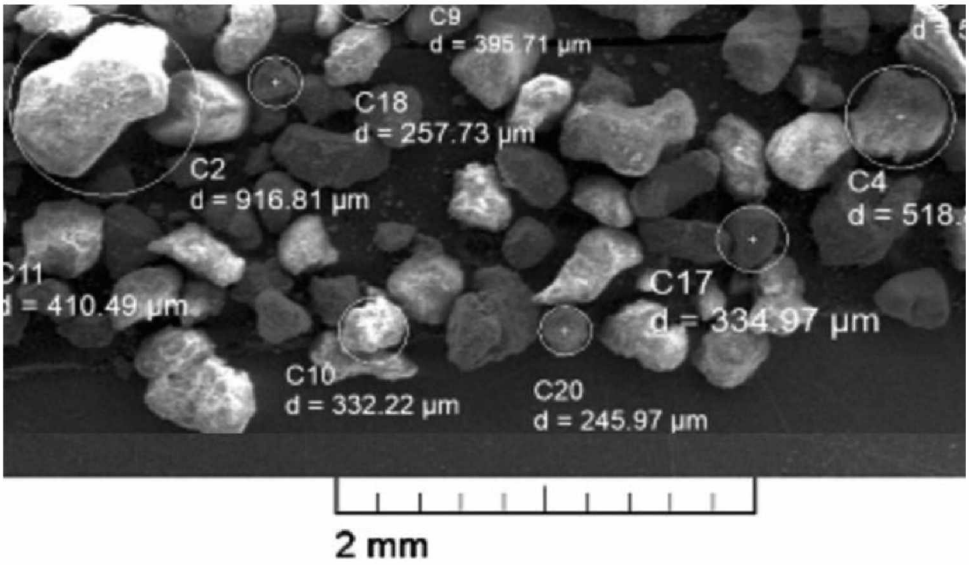


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение зерен глауконитового песка. Пример определения размеров частиц

Таким образом, длительная практика ведения технологического контроля процессов на опытной линии ООО «ЭкоСорбент» при получении порошкообразных и гранулированных материалов показала преимущества использования СЭМ в технологическом контроле: несложная пробоподготовка, быстрое получение наглядного результата и простота его интерпретации при наличии собственной статистики данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вениг С. Б., Сержантов В. Г., Чернова Р. К, Щербакова Н. Н., Селифонова Е. И., Сплюхин В. П., Хапцев З. Ю. Отечественные технологии получения и применения глауконитовых сорбентов для очистки и восстановления объектов от химических загрязнений // Химическая безопасность. 2018. Т. 2. № 2. С. 183–198.

DOI: 10.17076/TM15_62

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АПОДОЛОМИТОВОГО НЕФРИТА НА ПРИМЕРЕ ЗАЛЕЖИ № 1 УЧАСТКА ПРОЗРАЧНЫЙ КАВОКТИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СРЕДНЕ-ВИТИМСКАЯ ГОРНАЯ СТРАНА

Кислов Е. В.

Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ

Нефрит – мономинеральная спутанно-волокнистая порода, состоящая из тремолита, реже актинолита или других амфиболов. Нефрит – высоколиквидный ювелирно-поделочный камень, издавна используемый человеком, особо популярный в Китае, Новой Зеландии, Центральной Америке. Наиболее ценятся белый просвечивающий нефрит, черный, ярко-зеленый с минимальным количеством рудных минералов, а также с эффектом «кошачьего глаза», аллювиальные гальки с каемками прокрашивания.

Месторождения нефрита относятся к двум эндогенным геолого-промышленным типам: апоультрамафитовые метасоматиты офиолитов (апосерпентинитовый) и апокарбонатные тремолит-кальцитовые магнезиальные скарны

(аподоломитовый). Ко второму типу близки месторождения Дахуа в Гуанси-Чжуанском автономном районе [4] и Лодян в провинции Гуйчжоу [3] на юге Китая, образовавшиеся на контакте диабазов и известняков. Месторождения первого типа – источник преимущественно зеленого до бурого и черного нефрита, месторождения второго типа дают, в основном, светлоокрашенный нефрит от белого до светло-зеленого, бурого (медового) вследствие окисления двухвалентного железа до трехвалентного, реже встречается черный нефрит [2, 4]. Экзогенный геолого-промышленный тип представлен россыпями, из которых наиболее продуктивны аллювиальные.

Светлоокрашенный нефрит в бассейне р. Кавокта найден в 1983 г. при проведении экспедицией «Байкалкварцсамоцветы» поисковых работ на нефрит в районе нижнего течения р. Ципа. Первый аллювиальный валун нефрита обнаружил Ю.С. Вепрев. В.И. Стругов и В.Я. Беляев выявили и оконтурили ореол распространения валунов нефрита в русловых отложениях р. Кавокта. В 1984 г. В.И. Струговым и Н.В. Секериной найдены коренные выходы. В 1984–1993 гг. в бассейне верхнего течения р. Кавокта было разведано Кавоктинское коренное месторождение с Прозрачным и Медвежьим участками, переданное для отработки в 1994 г. С 2007 г. семейно-родовой эвенкийской общиной «Дылача» проводились добыча с эксплуатационной разведкой. АО «Забайкальское горнорудное предприятие» с 2014 г. ведет геологоразведочные работы и эксплуатацию [1]. В 2021 г. поставлены на баланс запасы Левобережного участка.

Эта работа посвящена геологической обстановке, минеральному составу и особенностям формирования нефрита месторождения на примере залежи № 1 участка Прозрачный.

Кавоктинское – наиболее крупное месторождение аподоломитового нефрита России: на 01.01.2022 запасы по C_2 составляют 346.81 т. В 2021 г. добыто 70.36 т или 28.58% добычи нефрита России. Месторождение выделяется высоким качеством нефрита.

Площадь месторождения сложена гранитами, диоритами 1-й фазы позднепалеозойского витимканского комплекса. В меньшей степени проявлены небольшие тела лейкократовых гранитов 2-й фазы витимканского комплекса. В гранитах залегают ксенолиты сложной формы, останцы в провисах кровли пород талалинской толщи (ранее – суванихинской свиты), как сейчас считается, нижнего протерозоя. Они представлены метапесчаниками, кристаллическими сланцами, амфиболитами, доломитовыми мраморами. Степень метаморфизма отвечает амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациям. Полная метасоматическая зональность: доломитовый мрамор – кальцифир – кальцит-тремолитовый скарн с нефритом – эпидот-тремолитовый скарн – амфиболит или диорит. Чаще наблюдаются сокращенные варианты зональности.

На месторождении выделено 3 участка, состоящих из 6 нефритоносных зон, включающих в себя залежи нефрита. Участок Прозрачный на северо-западе месторождения включает нефритоносные зоны 1 и 2. Нефритоносная зона 1 субширотного простирания находится на южном фланге участка и объединяет залежи № 1, 4, 9.

Залежь № 1 – нефритовое тело с тектоническими контактами сложной морфологии с пережимами, раздувами в районе контакта доломитовых мраморов с эпидотизированными амфиболитами. Длина залежи 15 м, мощность 0.2–2.8 м, падение крутое на юго-запад под углом 60–70°. Вскрыта на глубину 15 м. На глубине выявляется сложная пропеллерообразная морфология за счет изменения углов падения от 20 до 65° [1].

Доломитовые мраморы слагают относительно небольшие тела удлиненной и неправильной формы. Это белые, светло-серые, средне-крупнозернистые породы с массивной, участками полосчатой текстурой. Состоят они из доломита (50–60%) и кальцита. В скарнированных мраморах отмечается до 5% форстерита, диопсида, тремолита, серпентина.

Амфиболиты пространственно тяготеют к телам доломитовых мраморов. Внешне они представляют полосчатые и пятнистые породы зеленоватых тонов, сложены крупными призматическими зернами роговой обманки и неправильно-таблитчатыми – плагиоклаза. В незначительных количествах присутствует магнетит, микроклин, хлорит, титанит. Вторичные изменения выражаются в замещении амфибола эпидот-клиноцоизитовым агрегатом, хлоритизации, актинолитизации, соссюритизации.

Вмещающие ксенолит гранитоиды витимканского комплекса представлены порфировидными и крупнозернистыми слабо гнейсовидными разностями.

Кальцит-тремолитовые скарны, продуктивные на нефрит, представлены узкими зонами мощностью до 3–4 м. Распространены относительно простые линзо- и жилообразные формы

тел различной протяженности и мощности, как правило, с четкими, достаточно прямолинейными контактами, выдержанным падением на глубину. Кальцит-тремолитовые скарны – белые массивные, полосчатые, пятнистые скрытокристаллические породы. Они сложены агрегатом тонкозернистого, тонколучистого кальцита и микроволокнистого тремолита.

Распределение нефрита в телах скарнов крайне неравномерное. Наиболее характерна прожилковая и линзовидная форма обособлений нефрита мощностью от n мм до n см с постепенными переходами к кальцит-тремолитовым скарнам. Более крупные обособления нефрита обычно имеют тектонические контакты с кальцит-тремолитовыми скарнами, часто с зеркалами скольжения, вдоль которых развивается длинноволокнистый тремолит. Окраска нефрита серовато-белая, светло-салатная, серовато-салатная до зеленой и серовато-медовой (бурой). Просвечиваемость от 1 до 5 см. Две системы крутопадающих трещин субширотного и северо-западного простирания разбивают нефрит и вмещающие породы на плоскопараллельные блоки толщиной 5–15 см и длиной 70–80 см.

Минеральный состав 16 образцов керна залежи № 1 изучен в шлифах под петрографическим микроскопом «ПОЛАМ Л-213» и в аншлифах на растровом электронном микроскопе LEO-1430VP с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 в ГИН СО РАН, Улан-Удэ.

Структура нефрита в шлифах разнообразная часто с участками разных структур в одном шлифе: фибробластовая до гранонематобластовой, микроволокнистая до спутанно-микроволокнистой, радиально-лучистая, метельчатая, реликтовая до псевдоморфной. Текстура пятнистая, неоднородная, беспорядочная, реже массивная, сланцеватая, реликтовая решётчатая.

Зафиксировано 25 минералов, относящихся к следующим стадиям:

– Реликтовые минералы доломитов и амфиболитов: алланит, доломит, хроммагнетит, титанит, скаполит (мейонит), циркон, эпидот;

– Метасоматические минералы донефритовой стадии: диопсид (корродированные реликты), форстерит;

– Метасоматические минералы нефритовой стадии: апатит (отмечены включения кальцита), кальцит I (отмечены включения тремолита и фторапатита), тремолит, флогопит;

– Минералы гидротермальной стадии: ангидрит, барит, галенит, молибденит, пирит, сфалерит, флюорит, шеелит. В сульфидах за редким исключением не фиксируются изоморфные примеси, что говорит об их низкотемпературном происхождении;

– Минералы вторичных изменений: кальцит II, пренит, романешит (?), серпентин, хлорит.

Широкое развитие фторфлогопита и фторапатита объясняет отмечавшиеся ранее высокие содержания F в аподоломитовом нефрите. Редкие мелкие зерна флюорита не могут обеспечить этот феномен.

Причины окраски. В тремолите 12 образцов различной окраски FeO не обнаружено. В серовато-салатных (обр. 550101) – 0–1.45 %, (обр. 519703) – 0–4.64 %, серовато-зеленых (обр. 915902) – 0.78–1.24 %, (обр. 916202) – 0.82–3.91 %, в черной части образца до 14.23 %. Зеленая окраска определяется примесью Fe в тремолите: по мере увеличения содержания Fe тон становится насыщеннее, что отмечалось и ранее [1]. Черная окраска нефрита в образце 916202 объясняется высоким содержанием Fe из-за близкого контакта с амфиболитом – только этот образец содержит титанит и хроммагнетит. Черный участок сложен тремолитом и актинолитом с крайне неравномерным распределением Fe.

Формирование нефрита, судя по взаимоотношениям минералов, проходит в несколько стадий. Первоначально доломит на прогрессивной стадии метасоматоза с участием содержащих кремнезем из амфиболитов флюидов замещается диопсидом:

$$CaMg(CO_3)_2 + 2Si^{4+} + 2O_2 \rightarrow CaMgSi_2O_6 + 2CO_2$$

На регрессивном метаморфическом этапе уже диопсид при участии магния и кремнезема из амфиболитов замещается агрегатом тремолита (нефритом):

$$2CaMgSi_2O_6 + 3Mg^{2+} + 4Si^{4+} + H_2O + 5{,}5O_2 \rightarrow Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2$$

В другом варианте диопсид замещается кальцит-тремолитовым скарном – углекислота из первой реакции, кислород из вмещающих пород:

$$5CaMgSi_2O_6 + H_2O + 3CO_2 \rightarrow Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + 3CaCO_3 + 2SiO_2$$

При этом кальцит скарна также может замещаться тремолитом с образованием нефрита:

$$2CaCO_3 + 5Mg^{2+} + 8Si^{4+} + H_2O + 10{,}5O_2 \rightarrow Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + 2CO_2$$

В некоторых образцах диопсид не установлен – либо он весь заместился, либо тремолит образуется непосредственно по доломиту:

$$2CaMg(CO_3)_2 + 8Si^{4+} + 3Mg^{2+} + H_2O + 9{,}5O_2 \rightarrow Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2 + 4CO_2$$

При продолжении регрессивного процесса тремолит замещается хлоритом и кальцитом с привносом глинозема из амфиболита, что приводит к ухудшению качества нефрита:

$$Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2 + 2Al^{3+} + 3H_2O + 2CO_2 + 1{,}5O_2 \rightarrow Mg_5Al[Si_3AlO_{10}](OH)_8 + 2CaCO_3 + 5SiO_2$$

При этом роль гранитов сводится к региональному повышению температуры, обеспечивающему метасоматические реакции. Непосредственное участие в метасоматозе не гранита, а амфиболита, содержащего больше Fe, определяет разнообразие цветовой гаммы нефрита. Роль метаморфизма сводится к тектоническому дроблению, облегчающему проникновение флюидов, и стрессу, обеспечивающему спутанно-волокнистую скрытокристаллическую текстуру нефрита.

Выводы. Изучены 16 образцов нефрита из керна залежи № 1 участка Прозрачный Кавоктинского месторождения аподоломитового нефрита в Средне-Витимской горной стране. Диагностированы 25 минералов, отнесенные к реликтовым, метасоматическим донефритовой и нефритовой стадий, гидротермальным и вторичным. Высокие содержания F в аподоломитовом нефрите объяснены широким развитием фторапатита и фторфлогопита. Интенсивность зеленой окраски нефрита объяснена примесью Fe в тремолите, а черная окраска – развитием актинолита в участках контакта с амфиболитом. Приведена модель формирования нефрита: развитие по доломиту диопсида, замещение диопсида тремолитом, замещение призматического тремолита спутанно-волокнистым. В отдельных случаях тремолит может развиваться непосредственно по доломиту. В дальнейшем тремолит замещается хлоритом. Граниты обеспечивают теплом метасоматоз. Участие в образовании нефрита амфиболита определяет разнообразие цветовой гаммы нефрита. Метаморфизм вызывает тектоническое дробление, облегчающее проникновение флюидов, и стресс, обеспечивающий спутанно-волокнистую скрытокристаллическую текстуру нефрита.

Автор признателен за предоставленные материалы АО «Забайкальское горнорудное предприятие», персонально А. П. Суздальницкому, Е. В. Раевской, выполнение анализов – Е. А. Хромовой, Е. В. Ходыревой. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20003, https://rscf.ru/project/22-27-20003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гомбоев Д. М., Андросов П. В., Кислов Е. В. Кавоктинское месторождение светлоокрашенного нефрита: условия залегания и особенности вещественного состава // Разведка и охрана недр. 2017. № 9. С. 44–50.

2. Flin D. J., Dubowski E. A. Cowell jade province: detailed geological mapping and diamond drilling of jade and ornamental marble outcrops, 1982–1987. Department of mines and energy of South Australia. Rept. Bk. N 89/51. Dme N 85/88. 1991. V. 2. 98 p., V. 3. 26 p., V. 4. 29 p.

3. Zhang Y-D., Yang R.-D., Gao J.-B., Chen J., Liu Y.-N., Zhou Z.-R. Geochemical characteristics of nephrite from Luodian County, Guizhou Province, China // Acta Minerlogica Sinica. 2015. V. 35, N 1. P. 56–64.

4. Zhong Q., Liao Z., Qi L., Zhou Z. Black nephrite jade from Guangxi, Southern China. Gems and Gemology. 2019. V. 55, N 2. P. 198–215.

DOI: 10.17076/TM15_63

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ КОРПАНГА В КАЧЕСТВЕ КВАРЦ-ПОЛЕВОШПАТОВОГО СЫРЬЯ

Ильина В. П.[1], Бубнова Т. П.[1, 2], Фролов П. В.[1]

[1] *Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск*
[2] *Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск*

Введение

Для большинства современных горнодобывающих предприятий актуальным вопросом является реорганизация недропользования с учетом более рационального комплексного освоения месторождений полезных ископаемых, охраны недр и охраны окружающей среды в соответствии с требованиями федеральных законов РФ и нормативной правовой документации [16]. В больших объемах отвалы горных пород могут использоваться в производстве щебня. Вместе с тем, отвалы и отходы переработки горных пород могут содержать не менее важные и дефицитные полезные ископаемые и минералы, что предопределяет актуальность и целесообразность изучения их состава с целью выявления возможных областей использования [11].

Отвалы и хвостохранилища Костомукшского ГОКа занимают обширные площади, на их содержание предусмотрены значительные средства. Комплексное геологическое и технологическое изучение вскрышных пород показало, что они могут использоваться в качестве строительных материалов и технологического сырья различного назначения [3, 8].

Месторождение Корпанга находится в северной части Костомукшского железорудного района и было открыто как железорудное месторождение среднего размера по результатам геофизических [14, 15, 16] и геолого-съемочных [2, 8, 7] работ. В 1974–1976 гг. на участке были проведены поисковые и поисково-оценочные работы [9, 10], а в 1977–1981 гг. – детальная разведка [6]. В настоящее время разработку месторождения осуществляет АО «Карельский окатыш», который входит в горнодобывающий (сырьевой) дивизион компании «Северсталь». Ранее вскрышные породы Костомукшского железорудного месторождения изучались в Институте геологии КарНЦ РАН [12]. Как наиболее перспективные породы в качестве нетрадиционного полевошпатового сырья были изучены геллефлинты и плагиопорфиры [13]. На месторождении Корпанга были выделены залежи лептитовых гнейсов, по минеральному составу аналогичные натриевой геллефлинте. Однако предыдущие результаты исследований не позволяют сделать вывод о возможном использовании лептитовых гнейсов в качестве полевошпатового сырья для керамики. В настоящей работе представлены результаты минералого-технологического исследования лептитовых гнейсов, выполненные с целью оценки возможности их использования в качестве заменителя традиционного полевошпатового сырья для получения керамических материалов.

Материалы и методы исследований

Материалом для исследований послужили две технологические пробы лептитовых гнейсов массой по 25 кг каждая, отобранные на месторождении Корпанга из скважины № 377 в интервалах 75.8–90.9 м (проба 377/80) и 178.6–237.5 м (проба 377/200). По минеральной, химической и гранулометрической характеристикам лептитовые гнейсы аналогичны натриевой геллефлинте Центрального карьера Костомукшского месторождения. Последние хорошо изучены в технологическом плане на полевошпатовое сырье для керамики [3].

Минеральный и химический составы лептитовых гнейсов, исследованы на базе лабораторного оборудования Аналитического центра Института геологии КарНЦ РАН. Минеральный состав проб оценивался методом петрографического изучения шлифов на оптическом микроскопе ПОЛАМ Р 211, а также методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford Instruments). Химический состав проб изучен методом мокрой химии. Физико-механические свойства образцов керамики проверены на соответствие ГОСТам [4, 5].

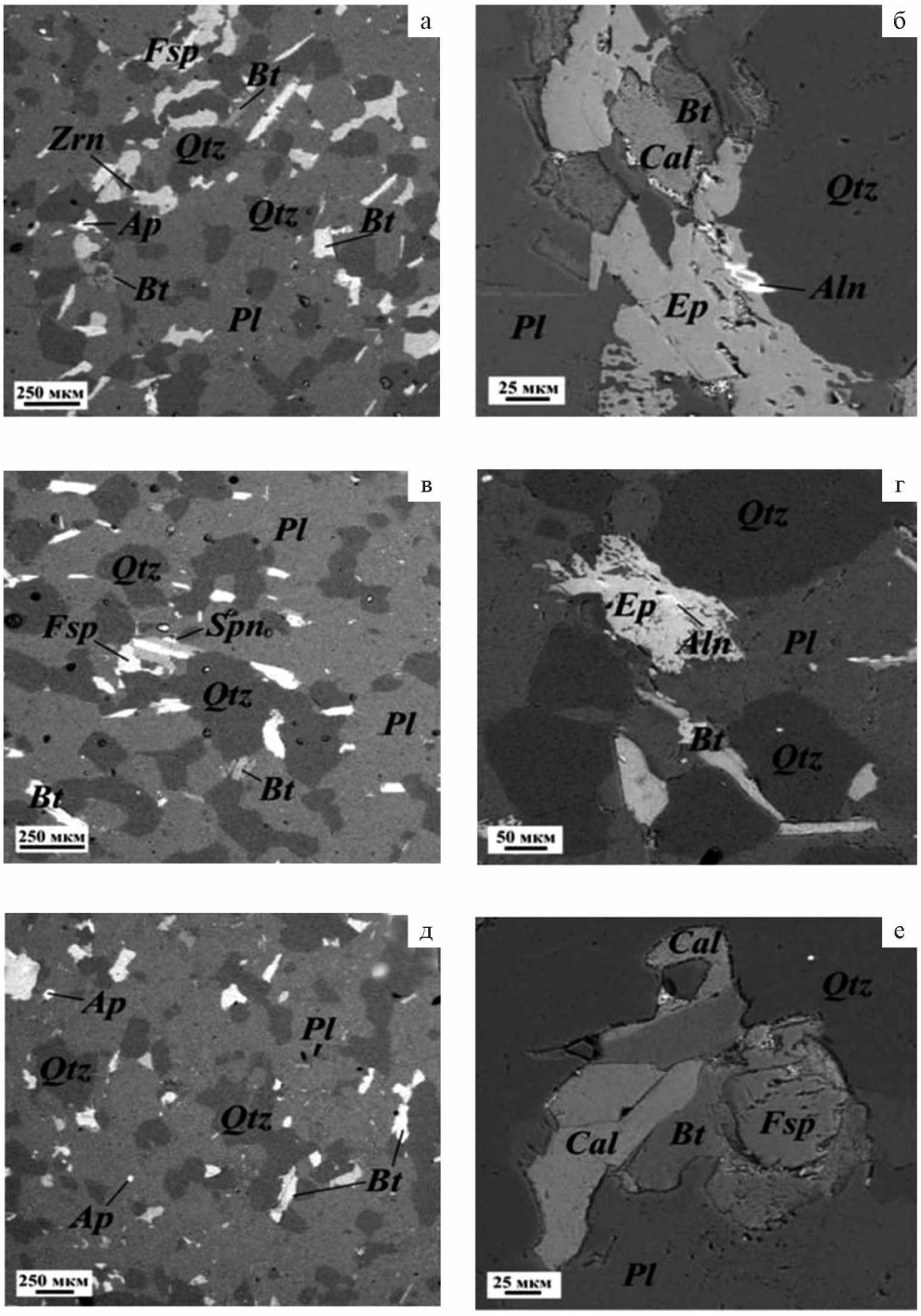


Рис. 1. BSE-изображения лептитовых гнейсов: а, б, в-проба 377/80; г, д, е – проба 377/200

Условные обозначения: Aln – алланит; Ap – апатит; Bt – биотит; Cal – кальцит; Ep – эпидот; Fsp – K – полевой шпат; Ms – мусковит; Pl – кислый плагиоклаз; Spn – титанит; Qtz – кварц; Zrn – циркон

Результаты исследования

Минеральный и химический состав лептитовых гнейсов

Лептитовые гнейсы Корпангского месторождения представляют собой глубоко метаморфизованные эффузивные породы. Петрографическое изучение показало, что они представлены мелкозернистым кварц-полевошпатовым агрегатом с переменным содержанием биотита, мусковита, эпидота (рис. 1). В виде примесей отмечаются зерна карбоната, рудных минералов. Из акцессорных минералов встречаются циркон, титанит, гранат, турмалин. Плагиоклаз является основным породообразующим минералом

с содержанием в породе от 40 до 65 %, представлен преимущественно кислым плагиоклазом (альбит-олигоклазом). Микроклин присутствует в подчиненном количестве 3–7 %. Содержание кварца в породе варьирует от 25 до 40 %. В составе кварц-полевошпатового агрегата преобладают зерна размером от 0.05 до 0.1 мм, также отмечаются порфировидные обособления размером до 1 мм.

Содержание второстепенных минералов – биотита, мусковита, эпидота варьирует в пределах от 1 до 15 %. Биотит представлен мелкими (0.05–0.2 мм) чешуйками, замещающимися эпидотом, мусковитом, магнетитом. Мусковит развивается в виде редких удлиненных чешуек за счет замещения биотита и плагиоклаза. Эпидот развит в виде вытянутых призматических зерен размером от 0.1 до 0.3 мм, тесно ассоциирует с алланитом (рис. 1 б, г). Кальцит образует ксеноморфные зерна размером от 0.1 до 2 мм.

По сравнению с геллефлинтами [3] лептитовые гнейсы месторождения Корпанга характеризуются более крупнозернистой структурой. Для них характерно повышенное содержание окислов железа. Сравнительная характеристика химического состава приводится в таблице.

Химический состав технологических проб, мас. %

Оксиды	Уч. Корпанга		Натровая геллефлинта уч. Центральный*
	Пр. 377/80	Пр. 377/200	
SiO_2	69.58	67.68	69.30
TiO_2	0.11	0.14	0.07
Al_2O_3	15.38	14.93	17.45
Fe_2O_3	1.25	1.39	0.61
FeO	2.30	3.52	0.87
MnO	0.031	0.043	0.02
MgO	1.41	1.51	0.77
CaO	2.80	2.87	2.55
Na_2O	5.15	5.00	5.91
K_2O	1.16	1.11	1.17
H_2O	0.05	0.06	0.21
ppp	0.58	1.73	0.88
S	99.80	99.98	99.81

Примечание: * Приведены усредненные содержания по 20 пробам по [3, 12].

Обогатимость лептитовых гнейсов

На рисунке 2 иллюстрируется распределение лимитируемых оксидов [5] по классам крупности по данным выполненных ранее исследований на обогатимость лептитовых гнейсов [12]. Высокое содержание оксидов железа наблюдается в мелких (0–0.25 мм) фракциях проб (рис. 2 а). Это связано с присутствием в породе микроскопических включений магнетита, а также тем, что биотит, характеризуясь низкими показателями твердости, при измельчении переходит именно в эти классы крупности.

Содержание оксида натрия в мелких фракциях (рис. 2 в) больше в пробе геллефлинты, чем в пробах лептитовых гнейсов, а оксида калия меньше содержится в геллефлинте (рис. 2 б). Анализ лимитирующих компонентов в составе исходных технологических проб лептитовых гнейсов и сопоставление его с техническими требованиями к кварц-полевошпатовому сырью [5], показал необходимость измельчения их для эффективного удаления железосодержащих примесей.

Флотационное обогащение лептитовых гнейсов было выполнено по схеме, разработанной для геллефлинт [7, 12]. Технологическая схема включала дробление, измельчение до крупности менее 0.071 мм, обесшламливание по зерну

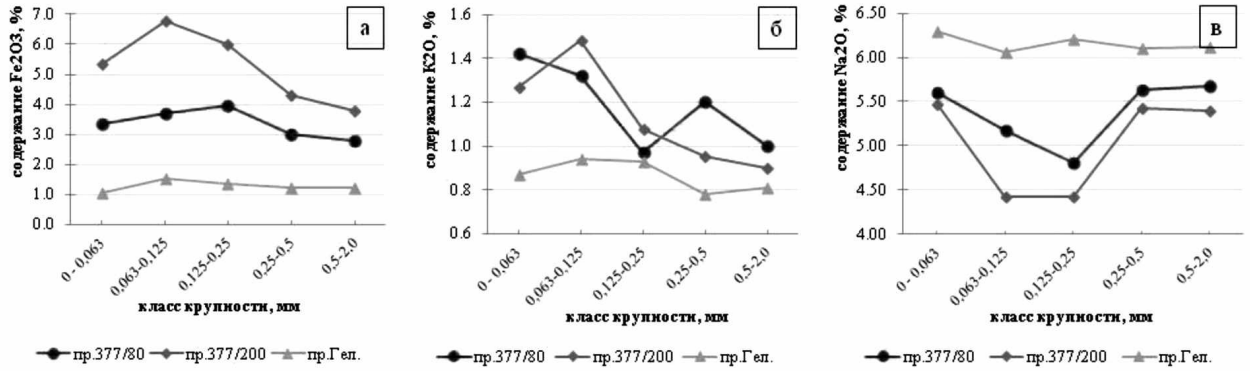


Рис. 2. Распределение лимитируемых оксидов Fe_2O_3, K_2O, Na_2O в технологических пробах по классам крупности: пр. 377/80, 377/200 – лептитовые гнейсы; пр Гел. – геллефлинта

0.02 мм и флотацию железосодержащих минералов и слюд с контрольной электромагнитной сепарацией флотоконцентрата. Концентрат, полученный после флотомагнитного обогащения лептитовых гнейсов, содержал менее 0.2% оксида железа, что соответствует требованиям ГОСТ 70-30-75 на сырье для тонкой керамики. Однако по содержанию щелочных (K_2O+Na_2O) и щелочноземельных ($CaO+MgO$) окислов не соответствовал требованиям ГОСТа [5].

Керамические испытания лептитовых гнейсов

В керамическом производстве полевошпатовое сырье используется в качестве плавня. В процессе обжига полевой шпат, образуя стеклофазу, уменьшает пористость обожженных изделий, обеспечивает процесс спекания и придает материалу прочность, компактность и термостойкость [1]. В настоящей работе при получении керамических изделий традиционное полевошпатовое сырье было заменено на лептитовые гнейсы. Керамические испытания выполнены по методике исследования кварц-полевошпатового сырья в соответствие с ГОСТ [4, 5].

За основу при расчете фарфоровой массы был взят состав классической массы твердого фарфора: 50% глинистых минералов (глина, каолин), 25% кварца и 25% полевых шпатов. Затем, с учетом содержания кварца в концентрате исследуемой пробы, рассчитан материальный состав массы: полевошпатовый концентрат лептитовых гнейсов – 37.23%; кварцевый песок – 12.77%; каолин (Просяновское месторождение) – 38%; глина (Веселовское месторождение) – 12%. Химический состав полученной фарфоровой массы (в мас. %): SiO_2 – 65.18; TiO_2 – 0.32; Fe_2O_3 – 0.37; Al_2O_3 – 23.48; CaO – 1.16; MgO – 0.25; Na_2O – 2.57; K_2O – 0.42.

Образцы обожженной керамики испытывались для определения усадки при обжиге, пористости по водопоглощению, прочности при изгибе. Зависимость изменения керамических свойств от температуры обработки образцов представлена на рисунке 3. Видно, что повышение температуры термообработки сопровождается прогрессирующим увеличением линейной усадки при обжиге и снижением значений пористости, что свидетельствует об активном образовании стеклофазы за счет полевого шпата в лептитовых гнейсах. Водопоглощение образцов в этом интервале наименьшее – 0.16%, что соответствует ОСТу 17-84-71, по которому этот показатель для спекшегося черепка должен быть не более 0.20%. Показатели усадки при обжиге и пористости близки для образцов, полученных на основе лептитовых гнейсов и геллефлинты и различаются в пределах 2–3%. Полученные данные усадки и пористости образцов опытной массы при различных температурах обжига показали, что интервал спекания массы лежит в пределах 1200–1250 °С, что значительно ниже температуры обжига изделий тонкой керамики, получаемой с использованием пегматита, принятой на фарфоровом заводе им. Ломоносова в Санкт-Петербурге 1370–1400 °С [1].

Значения прочности при изгибе керамических образцов увеличиваются с повышением температуры обжига до 1250 °С (рис. 3). Значительное увеличение начинается при температуре обжига 1050 °С. Максимальное возрастание прочности при изгибе наблюдается при 1250 °С. Вероятно, повышение прочности происходит в результате образования необходимого количества стеклофазы, наряду с образованием и ростом новых кристаллических фаз за счет процессов разложения и перекристаллизации минералов, составляющих сырье.

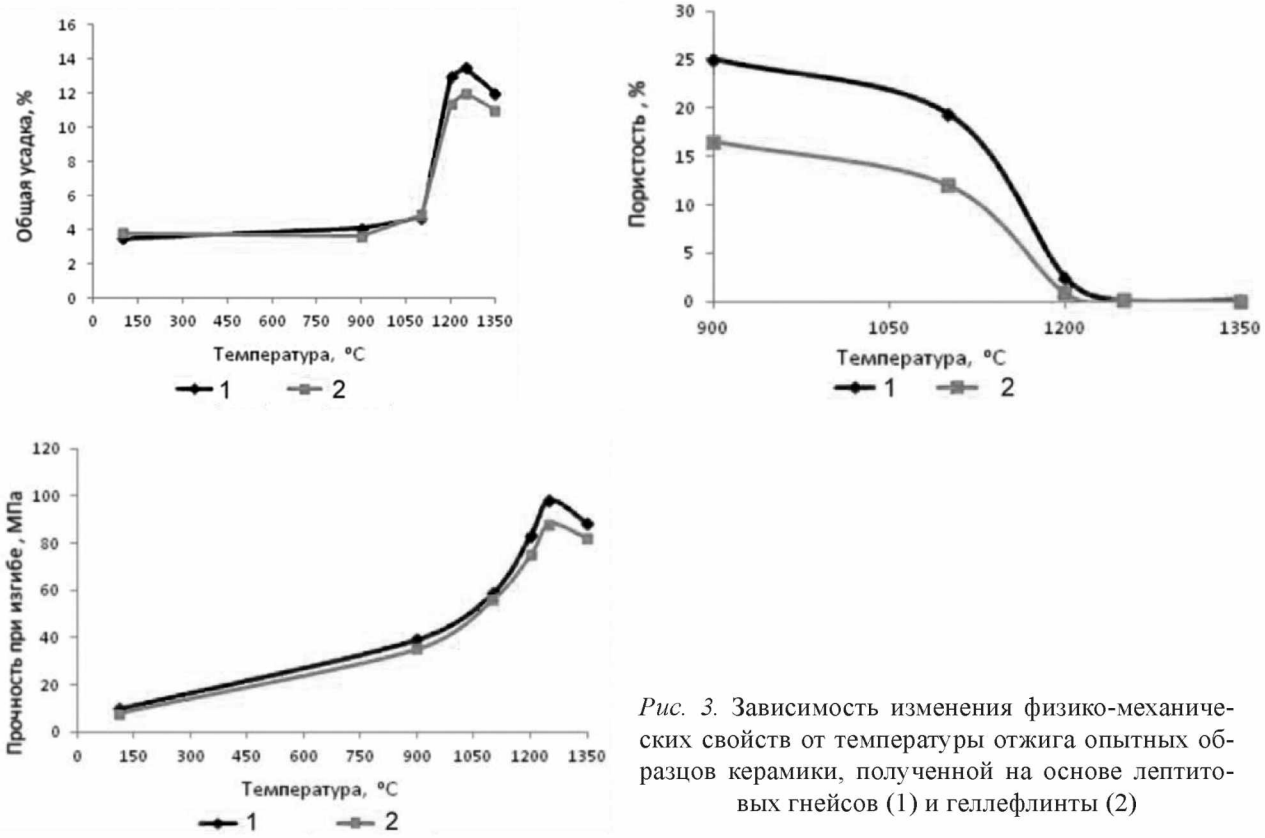


Рис. 3. Зависимость изменения физико-механических свойств от температуры отжига опытных образцов керамики, полученной на основе лептитовых гнейсов (1) и геллефлинты (2)

Белизна глазурованных и не глазурованных образцов керамики, полученной с использованием полевошпатового концентрата из лептитовых гнейсов (66.8% и 63.8%, соответственно) отвечает требованиям I-го сорта по ОСТ 17-84-71 на «Посуду фарфоровую столовую и чайную», но значительно уступает белизне изделий, изготовленных с применением концентрата из геллефлинты (70.6 и 73.8%, соответственно).

Заключение

Лептитовые гнейсы месторождения Корпанга представляют собой глубоко метаморфизованные крупнозернистые породы и отличаются повышенным содержанием окислов железа по сравнению с геллефлинтой. Полевошпатовый концентрат, полученный флотомагнитным обогащением лептитовых гнейсов можно использовать для получения керамических материалов, не требующих высокой белизны, например, для керамической облицовочной плитки и плитки для полов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Августиник А. И. Керамика. Л.: Стройиздат (Ленинградское отделение), 1975. 692 с.

2. Алексеев И. И. Отчет о результатах комплексных геофизических работ Койвасозерской и Костомукшской партий за 1971–72 гг. 1973. Фонды КГЭ.

3. Вскрышные породы Костомукшского железорудного месторождения и пути их использования в народном хозяйстве. Петрозаводск: Карелия, 1983. 142 с.

4. ГОСТ 13449-2017 Изделия санитарные керамические. Методы испытаний. 2017.

5. ГОСТ 7030-75 Материалы полевошпатовые и кварц-полевошпатовые для тонкой керамики. 1975.

6. Громова З. Т., Вейхер А. А., Куницын В. Л., Гайс Л. И., Зиновьева З. А. Объяснительная записка к обзорной карте месторождений строительных материалов Карельской АССР масштаба 1 : 000000. М., 1973. 189 с.

7. Каменева Е. Е., Скамницкая Л. С. Обогащение минерального сырья Карелии. Петрозаводск, 2003. 230 с.

8. Минерально-сырьевая база Республики Карелия // Кн. 2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск: Карелия, 2006. 356 с.

9. Мошков Е. И. Отчет о результатах детальной разведки Корпангского месторождения железных руд

за 1978–1981 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.82 г. 1982. Фонды КГЭ.

10. Налимов А. А., Руденко Г. В., Лагай А. С., Антонов А. А. Отчет о геологосъемочных работах м-ба 1:50000, проведенных Кондокской партией в р-не Костомукшского железорудного м-ния в 1970–74 гг. 1974. Фонды КГЭ.

11. Ожогина Е. Г., Якушина О. А. Будни технологической минералогии / Сб. Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного месторождения. Петрозаводск, 2022. С. 7–11.

12. Отчет о изучении вскрышных пород и отходов осваемаевых рудных месторождений КАССР с целью утилизации: Отчет о НИР ч. I Вскрышные породы Костомукшского ГОКа. Петрозаводск, 1984.

13. Пекки А. С., Разоренова В. И. Месторождения полевошпатового сырья Карелии. Л.: Наука, 1977. 152 с.

14. Чернов и др. Вулканогенные железисто-кремниевые формации Карелии, 1970. 285 с.

15. Шаров Н. В. Открытие и разведка Костомукшского железорудного месторождения. Петрозаводск: Издательство КФ ПетрГУ, 2014. 103 с.

16. Шишков А. Ю. Новые перспективы применения отходов горнодобывающих производств Карело-Кольского региона // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 2. С. 90–97.

DOI: 10.17076/TM15_64

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МИНЕРАЛЫ В ОТДЕЛЕ ИСТОРИИ ИНСТИТУТА ЗЕМНОЙ КОРЫ СО РАН

Иванова Л. А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск

Как известно, при разработке месторождений каменного сырья попутно с добычей кондиционного материала вывозится большое количество низкосортного, использование которого в качестве поделочного камня ограничено. Непостоянство рыночного спроса на изделия из каменного материала тех или иных оттенков создает дополнительные трудности, значительное количество сортового материала в обработку не вовлекается. Однако, многие природные самоцветы, как правило, независимо от проявленной окраски содержат несколько других типов центров окраски: либо потенциальных, которые могут проявляться при каких-либо физических воздействиях, либо скрытых («затушеванных») уже проявленной более интенсивной окраской. Температурная устойчивость центров, процессы их образования и разрушения различны. Поэтому, изменяя температурный интервал отжига, можно разрушать одни и сохранять другие центры окраски. Модифицирование (облагораживание, кондиционирование) – это преобразование, изменение свойств (цвета, качества) ювелирных и поделочных камней различными методами, помимо огранки и полировки. Модифицирование камней производится различными способами, как аналогичными природным процессам, так и имеющими чисто искусственную природу. Разнообразные способы облагораживания камнесамоцветного сырья, направленные на улучшение декоративных свойств за счет изменения окраски, усиления цветового тона и прозрачности, известны с глубокой древности. Термическая обработка минералов, заложившая основу этому направлению, является составной частью многочисленных методов и технологических разработок по облагораживанию.

Экспозиция результатов разработанного сотрудниками лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза Института земной коры СО РАН способа обработки природных камней и изделий из них [3], наглядно демонстрирующая возможности облагораживания некондиционного поделочного сырья на примере улучшения декоративно-художественных свойств нефрита и других минералов служит наглядным пособием учебной коллекции в процессе проведения занятий в курсе лекций по «Облагораживанию ювелирных камней».

Еще в Древнем Китае практиковалось искусственное окрашивание нефрита в каштановый цвет – жад конский. В настоящее время облагораживание нефрита проводится в автоклавах в восстановительной атмосфере при давлении 400–500 атм, температуре 300–500 °С в течение 24–100 ч [5]. В результате за счет изменения

соотношения FeO/Fe_2O_3 происходит изменение цвета нефрита от грязно-зеленого до устойчивого яблочно-зеленого. Из табачно-бурых нефритов в окислительных условиях получают сургучно-красные и желтые. Иногда при этом получаются полихромные нефриты зеленовато-красного цвета, а бледно окрашенные разности в значительной степени осветляются. Методика облагораживания природных камней и изделий из них в гидротермальных условиях при высокой температуре и под давлением является для нефрита наиболее оптимальным методом обработки некондиционного материала с целью вовлечения его в производство.

В коллекции представлены исходные и облагороженные образцы Улан-Ходинского и Витимского нефритов (рис. 1, 2): пластины, кольца, браслеты, двухцветная гемма и другие изделия.

Несомненный интерес в учебной коллекции вызывают образцы агатов и халцедонов обработанных в газовых средах при атмосферном давлении (рис. 3) и методом изобарно-изотермической выдержки (автоклавная методика) [4]. В агатах окраска зачастую связана с тонкодисперсной примесью других минералов. Высокотемпературный отжиг применяется, чтобы усилить или проявить красно-оранжевую окраску, которая связана с тонкодисперсной примесью окислов и гидроокислов железа. Выдержка в окислительной среде приводит к усилению яркости окраски за счет частичного окисления железа до трехвалентной формы, а в восстановительной среде частичное восстановление железа до двухвалентного приводит к осветлению и проявлению скрытых полос. Автоклавная методика позволяет улучшать декоративно-художественные свойства агатов и халцедонов, проявляя тончайшие ранее невидимые зоны и усиливая яркость и контрастность камня.

В основе термообработки лежит способность преобразования центров окраски в минералах под действием повышенных температур. Подобные явления происходят непосредственно при образовании минералов в природных условиях. В ряде случаев наличие тех или иных окрашенных разновидностей даже в пределах одного месторождения определяется температурным режимом и составом окружающей среды.

Одним из методов термообработки является метод высокотемпературной выдержки в контролируемых средах. В основе экспериментальных исследований лежит способ изменения окраски халцедонов при термообработке в окислительной атмосфере, предложенной Н.И. Кашаевым с соавторами [2]. Способ включает в себя нагрев, выдержку и охлаждение в контролируемых условиях. Такой метод облагораживания повышает декоративность камня за счет увеличения яркости рисунка до темно-синего, почти черного, и ярко-оранжевого цветов, первоначально почти бесцветный фон при этом приобретает оттенок от нежно-розового до темно-вишнево-розового.

Образцы, обрабатываемые в газовых средах при атмосферном давлении, по скорректированной нами методике [4], укладываются в металлический контейнер объемом 2.5 л и засыпаются кварцевым песком. Песок используется в качестве инертного вещества, чтобы создавалась высокая тепловая инерция и обрабатываемый материал не испытывал термических напряжений. Затем контейнер ставится в большеобъемную муфельную печь КО-14. Время вывода на температурный режим – 24 ч. Образцы выдерживаются в течение определенного времени в режиме 300 ± 5 °С. Для поддержания окислительной атмосферы периодически через металлическую трубочку впрыскивается перекись водорода, которая при нагревании разлагается на кислород и воду в соответствии с реакцией $2H_2O_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O$. После необходимой выдержки контейнер охлаждается в течение 24 ч. В результате экспериментов за счет окисления Fe^{2+} до трехвалентной формы образцы приобретают роскошные сердоликовые окраски.

Метод изобарно-изотермической выдержки при повышенных температурах и давлениях в контролируемых условиях (автоклавная методика) (рис. 4) требует применения аппаратуры высокого давления традиционно применяемой при гидротермальных исследованиях в области температур 100–600 °С и давлений от 100 до 1000 атм.

В результате проведенных экспериментов по изменению окраски агатов и халцедонов этим методом выяснено, что для агатов и халцедонов, окраска которых связана с примесными включениями окислов и гидроокислов железа (гетитом, гематитом и т.д.), эта методика является действенным методом облагораживания.

Экспонируются в коллекции облагороженные образцы желто-зеленых бериллов Шерловой горы, приобретающих после обработки аквамариновые окраски. Представлена работа по залечиванию трещин в бериллах. Эксперименты с бериллом проводились при тех же параметрах Т–500 °С и Р–1000 атм, но ввиду сложности системы происходило постепенное усложнение флюидной фазы с последовательным введением в нее кислот, солей и щелочей. В чисто водно-

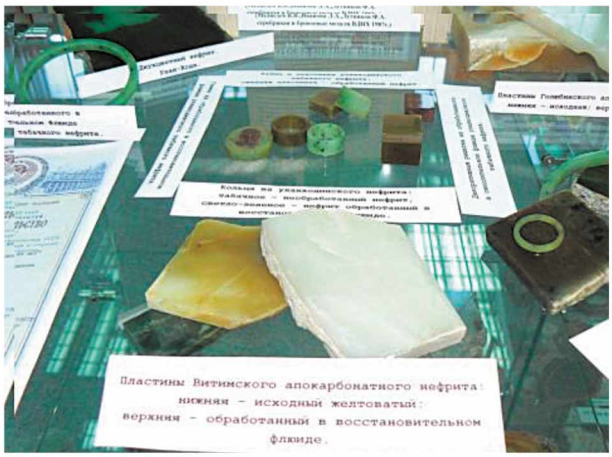


Рис. 1. Фрагмент экспозиции облагороженных нефритов



Рис. 2. Браслет из табачного, обработанного в восстановленном флюиде уланходинского нефрита на двухцветном яблочно-табачном образце

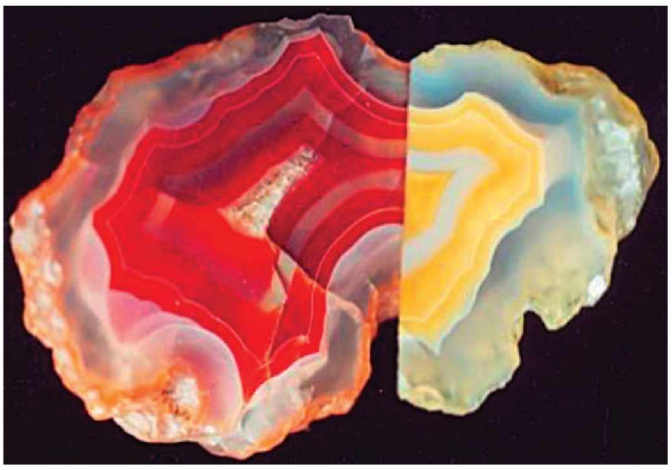


Рис. 3. Концентрически-зональный агат: справа – исходный, слева – термически обработанный

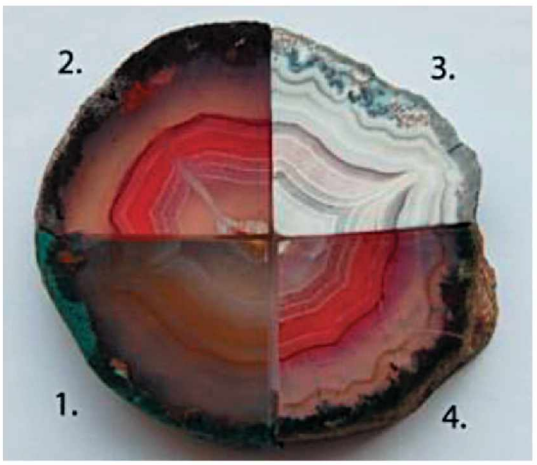


Рис. 4. Концентрически-зональный агат
1. Исходный; 2, 3 (автоклавная методика):
2. T–300 °C, P–1000 атм, H_2O+10 % O_2;
3. T–500 °C, P–1000 атм, H_2O+10 % H_2;
4. T–300 °C, P – атмосферное

водородной среде на поверхности берилла образовывался белый хлопьевидный налет хризоберилла Al_2BeO_4 с примесью кварца SiO_2.

В результате термического воздействия наблюдалось характерное изменение окраски берилла с голубовато-зеленой, желтовато-зеленой на насыщенно-голубую, что обусловлено хромофорными центрами, связанными с вхождением Fe^{2+}; Fe^{3+} в структуру берилла. Отдельная работа была посвящена облагораживанию шерловогорских бериллов (рис. 5). В данных экспериментах происходило восстановление железа ($Fe^{3+}\rightarrow Fe^{2+}$), что и стало причиной изменения окраски берилла. На основе полученных данных этой работы выявлена оптимальная методика, позволяющая улучшать сортность бериллов Шерловой горы.



Рис. 5. Аквамарины (справа), полученные методом автоклавной обработки желто-зеленых бериллов (слева). T–500 °C, P–1000 атм, H_2O+10 % H_2

В экспериментах по залечиванию трещин в бериллах, при отмеченных выше условиях начинается рост Be-содержащих минералов (хризоберилла, бертрандита) на поверхности образцов. Имея близкие к бериллу показатели преломления, некоторые из вновь образованных фаз могут играть роль заполнителей трещин и значительно повышать декоративные свойства камня.

Подводя итоги данного исследования, можно констатировать, что для «простых» минеральных систем рассмотренный механизм «залечивания» трещин и пустот в минералах является действенным и дает положительные результаты. А для многокомпонентных систем требуются дополнительные исследования и индивидуальный подход к каждой минеральной системе.

На месторождении «Сиреневый камень» добывается значительное количество ювелирных и поделочных разновидностей чароитита с яркой фиолетовой и сиреневой окраской, привлекательной совершенной структурой и высоким содержанием чароита-минерала. Попутно с высококачественным чароитом, извлекается большое количество сырья, которое по своим колориметрическим параметрам, механическим свойствам и эстетическим требованиям не соответствует критериям качества для камнерезной промышленности. Такое сырье нельзя отнести к высоким сортам камня. Поэтому, учитывая все эти данные: ограниченность запасов, существенная выработка качественного чароитита на уникальном, единственном в мире месторождении, возникает необходимость экспериментального исследования улучшения качества низкосортного камня.

Цветовое восприятие чароитита зависит от количества нахождения в породе самого чароита-минерала, от характера и количества сопутствующих (меланократовых и лейкократовых) минералов и от его структурно-текстурных особенностей.

В данной экспозиции представлены образцы прошедшие окрашивание органическими красящими веществами для приобретения устойчивой окраски чароитита (рис. 6, 7).

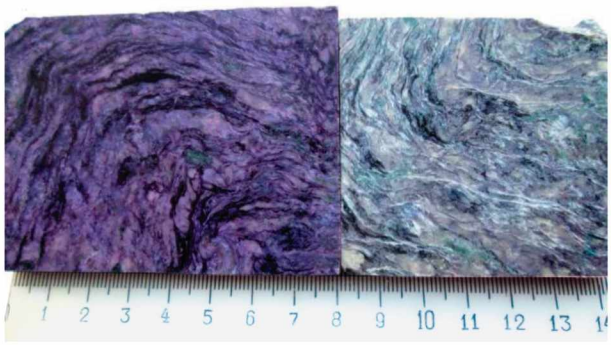


Рис. 6. Сланцевато-полосчатый чароитит: справа – исходный, слева – обработанный

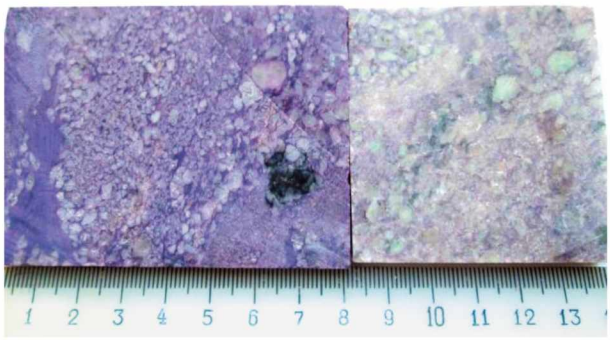


Рис. 7. Порфировидный чароитит: справа – исходный, слева – обработанный

Методика улучшения цветности некондиционного чароитита, заключающаяся в пропитке красящими веществами, относящимися к классу активных синтетических красителей, и последующем закреплении окраски во внутрипоровом пространстве камня, приемлема для реализации. Визуальные показатели цветовой характеристики облагороженного чароитита различных морфологических типов, позволяют сделать вывод о том, что приобретенная окраска становится близкой к лучшим разновидностям ювелирно-поделочного чароитового материала, устойчивой к бытовым агрессивным средам и привлекательной для потребителя. Процесс окрашивания образцов чароитита – это сложный многостадийный процесс [1], включающий в себя подготовку камня к окрашиванию, сам процесс крашения, закрепления полученного результата и проверки устойчивости окраски к воздействию водно-щелочных растворов, солнечного света и механической обработке. Технологический цикл составляет от 20 до 40 дней.

Все каменные коллекции в отделе истории Института земной коры служат наглядным материалом при проведении лекционных и практических занятий со студентами Иркутского государственного университета (ИГУ) и Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ). Используя отдел как учебную аудиторию для занятий, удается

значительно усилить восприятие излагаемого материала слушателями, так как многие экспонируемые образцы принимают непосредственное участие в лекционном процессе.

Аспиранты Института земной коры, начиная с первого года обучения в курсе обязательных лекций ведущих научных сотрудников института, получают возможность на примере экспозиций более детально ознакомиться с представляемыми научными направлениями. Пройдя по выставочным залам, вникнув в историю развития существующих в институте в настоящее время профильных геологических отделов, осознав, что отдел истории – это наша память, будущие сотрудники более ответственно и заинтересовано ощущают себя в институтском научном сообществе. Именно от них зависит сохранение преемственности, которая позволит вовлечь уже имеющиеся в Институте коллекции и отдельные выставочные образцы в новые экспозиции, так как одной из главных функций отдела истории Института является не только сохранение, но и дальнейшее пополнение коллекций, и формирование новых. За счет новых разработок сотрудников, студенческих курсовых и дипломных работ экспозиция учебной коллекции расширяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова А. Ю., Иванова Л. А. Облагораживание поделочного чароита // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН, 2015. № 3 (52). С. 86–94.

2. А.с. 566621 СССР. Способ обработки поделочных камней группы халцедонов и изделий из них / Кашаев Н. И., Кокарев Г. Н., Никольская Н. В., Самойлович М. И. Опубл. в Б.И.; 1977 б. № 28.

3. А.с. 1033584 СССР. Способ обработки природных камней и изделий из них / Медведев В. Я., Иванова Л. А. Опубл. в Б.И.; 1983. № 29.

4. Иванова Л. А., Медведев В. Я. Природа окраски и методы облагораживания минералов: учебное пособие. Иркутск: ИрГТУ, 2013. 216 с.

5. Медведев В. Я., Иванова Л. А. Флюидный режим нефритообразования. Новосибирск: Наука, 1989. 129 с.

АННОТАЦИИ

УДК 549.08:622

Котова О. Б., Ожогина Е. Г. **Комплексная оценка твердых полезных ископаемых: междисциплинарность технологической минералогии и современные вызовы // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 7–10: рис. 2. Библ. назв. 6.**

Показаны возможности комплексной оценки твердых полезных ископаемых методами технологической минералогии. Акцентировано внимание на научно-методическом сопровождении минералогических исследований, требованиях к минералогической информации, необходимых при оценке минерального сырья.

The possibilities of complex assessment of solid minerals by methods of technological mineralogy are shown. Attention is focused on the scientific and methodological support of mineralogical research, the requirements for mineralogical information necessary for the assessment of mineral raw materials.

Ключевые слова: комплексная оценка, технологическая минералогия, твердые полезные ископаемые, золошлаки, метрологическое обеспечение, межлабораторные сличительные испытания.

Keywords: comprehensive assessment, technological mineralogy, solid minerals, ash and slag, metrological support, interlaboratory comparison tests.

УДК 552.2+552.12+681.786

Войтеховский Ю. Л. **Петрографические структуры и статистики межзерновых контактов // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 10–14: рис. 1. Библ. назв. 33.**

В статье обращено внимание на современное неудовлетворительное определение петрографических структур и текстур. Именно это оставляет их описательными и не позволяет в полной мере учесть при характеристике горных пород и руд. Коротко изложен подход, основанный на статистиках межзерновых контактов, и дано математическое определение петрографической структуры. Указано, что подсчет статистик межзерновых контактов в шлифах в реальном времени и с высокой точностью возможен только с помощью адаптированных оптических анализаторов.

The article draws attention to the current unsatisfactory definition of petrographic structures and textures. This is what leaves them descriptive and does not allow them to be fully taken into account in the characterisation of rocks and ores. The approach based on intergrain contact statistics is briefly outlined and a mathematical definition of petrographic structure is given. It is pointed out that calculation of intergrain contact statistics in thin sections in real time and with high accuracy is possible only by means of adapted optical analyzers.

Ключевые слова: горные породы и руды, петрографические структуры и текстуры, статистики межзерновых контактов, оптические анализаторы.

Keywords: rocks and ores, petrographic structures and textures, intergrain contact statistics, optical analysers.

УДК 553.679

Кислов Е. В., Худякова Л. И., Малышев А. В., Гаркушева Н. М. **Ультраосновные и основные породы Бурятии – перспективное сырье для глубокой переработки // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 14–18: табл. 1. Библ. назв. 18.**

Исследованы возможности использования в строительной индустрии основных и ультраосновных пород Йоко-Довыренского массива, который несет высоколиквидную минерализацию и находится в развивающемся горнорудном районе, и интрузивов Метешихинский и Острая сопка, расположенных между Улан-Удэнской агломерацией и Тимлюйским цементным заводом. Щебень из таких пород имеет высокое качество и может использоваться для получения бетонов и асфальтобетонов повышенной прочности и долговечности. Использование ультраосновных и основных пород в качестве минеральной добавки позволит получать керамический кирпич, не уступающий по своим характеристикам традиционным аналогам.

The paper discussed the potential of mafic and ultramafic rocks from Yoko-Dovyren massif as a raw material for the building sector. The gravel from such rocks has high quality and can be used for the production of high-strength and durable concrete and asphalt concrete. The use of ultramafic and mafic rocks as a mineral additive allows for the production of ceramic bricks that are comparable in characteristics to traditional counterparts.

Ключевые слова: дунит, габбро, щебень, кирпич.

Keywords: dunite; gabbro; crushed stone; ceramic bricks.

УДК 553.823 (470.22)

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Фролов П. В. **Минеральный потенциал палеопротерозойского ультрамафит-щелочно-карбонатитового интрузивного Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса (Северная Карелия, Россия) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья**

природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 18–26: рис. 8., табл. 1. Библ. назв. 33.

Данные о минеральном потенциале Тикшеозеро-Елетозерского ультраосновного щелочно-карбонатитового интрузивного комплекса в Северной Карелии получены в результате многолетних целевых геолого-петрологических, минералого-геохимических, геохронологических и минерагенических исследований среднепалеопротерозойского магматизма данной территории. Охарактеризованы месторождения и проявления промышленных минералов (титаномагнетит, ильменит, нефелин и щелочные сиениты, карбонатиты с апатитом, кальцитом и оливинит), а также минерализация редких металлов и РЗЭ. Тикшеозерско-Елетьозрский комплекс может стать основой для формирования масштабного экономически прибыльного горнопромышленного узла.

Data on the mineral potential of the Tiksheozero-Yeletozero ultrabasic alkaline-carbonatite intrusive complex located in North Karelia were obtained by the long-term geologo-petrological, mineralogo-geochemical, geochronological and mineragenetic studies of Middle Paleoproterozoic magmatism in this area. Industrial mineral (titanomagnetite, ilmenite, nepheline and alkaline syenite, carbonatite with apatite and calcite and olivinite) deposits and occurrences, as well as rare-metal and REE mineralization, are described. The Tiksheozero-Yeletozero complex may provide a basis for the formation of an economically profitable mining zone.

Ключевые слова: щелочные сиениты, карбонатиты, ильмениты, оливиниты, палеопротерозой, месторождение, Тикшеозерско-Елетьозерский магматический комплекс, Республика Карелия.

Keywords: alkaline syenites, carbonatites, ilmenites, olivinites, paleoproterozoic, deposit, Tiksheozero-Yeletozero magmatic complex, Republic of Karelia.

УДК 550.75

Корольков А. Т. **Экологические последствия разработки аллювиальной россыпи монацита (Восточное Забайкалье) // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 27–29: Библ. назв. 11.**

Монацит – фосфат, содержащий редкоземельные элементы и торий (до 10%). С 1949 по 1964 год в мкр. Новотроицк г. Балея Забайкальского края действовало секретное предприятие по эксплуатации монацитовой россыпи, входившее в систему Атомного проекта СССР. Монацитовый песок использовался при строительстве. После закрытия предприятия обнаружилась высокая радиоактивность многих промышленных и жилых зданий. К настоящему времени большинство экологически опасных объектов разрушено. Но радиационная опасность для населения сохраняется. Обобщены результаты элементного анализа почвенных проб, отобранных в центральной части Новотроицка. Интерпретация полученных данных показала высокие содержания ряда элементов, значительно превышающие ПДК. Суммарный показатель загрязнения почв (индикатор загрязнения), рассчитанный по пяти химическим элементам (Pb, As, Sb, Ag, Th), указывает на умеренно опасную, опасную и чрезвычайно опасную для здоровья населения экологическую обстановку и необходимость проведения детального геохимического мониторинга почв.

Monazite is phosphate containing rare-earth elements and thorium (up to 10%). A secret monazite placer mining company was operating in Novotroitsk, Baleya, Trans-Baikal Region, under the USSR Atomic Project from 1949 to 1964. Monazite sand was used as building material. After the shutdown of the company, many industrial and apartment buildings were found to be highly radioactive. By now, most environmentally hazardous structures have been destroyed. However, radiation danger for the population persists. The results of element analysis of soil samples taken from the central zone of Novotroitsk are reported. The data obtained show high concentrations of some elements, which exceed maximum allowable concentrations. The total soil pollution index (pollution index), calculated for five chemical elements (Pb, As, Sb, Ag and Th), indicates an environmental situation moderately hazardous, hazardous and extremely hazardous for human health and the need to conduct detailed geochemical soil monitoring.

Ключевые слова: монацит, экология, геохимия почв, суммарный показатель загрязнения почв, радиация, город Балей.

Keywords: monazite, ecology, soil geochemistry, total indicator of soil pollution, radiation, Baley city.

УДК 546.78:622.766+622.778

Радомская Т. А., Канева Е. В., Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Чуешова А. Г., Белозёрова О. Ю., Митичкин М. А., Айсуева Т. С. **Выявление фаз в вольфрамовых концентратах, негативно влияющих на их качество // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 29–33: табл. 2. Библ. назв. 5.**

Методами гравитационной и электромагнитной сепарации разделены две пробы мелкозернистого и тонкозернистого вольфрамовых концентратов, полученных в результате обогащения лежалых хвостов Барун-Нарынского техногенного месторождения. Минеральный и химический состав исходных концентратов, и выделенных из него фракций исследован комплексом методов: оптико-минералогическим, минераграфическим, порошковой рентгеновской

дифракцией, рентгеноспектральным микроанализом, атомно-эмиссионной и рентгенофлуоресцентной спектрометрией. Показано, что вольфрамовые концентраты в качестве вредных примесей содержат серу, входящую в состав сульфидов. Обогащение вольфрамовых концентратов с помощью электромагнитной сепарации позволяет повысить их качество, удалить негативные фазы и получить несколько видов сырья: вольфрамит-гюбнеритовый концентрат 3 сорта и шеелитовый твёрдосплавный концентрат. Кроме вольфрамит-гюбнеритового и шеелитового концентратов была получена магнетитовая фракция, соответствующая богатым железным рудам и монацит-содержащая фракция, обогащённая редкоземельными элементами (лантаном и церием).

We separated two samples of fine-grained and close-grained tungsten concentrates using gravitational and electromagnetic separation methods. The concentrates were obtained as a result of the enrichment of stale tailings of the Barun-Naryn technogenic deposit. The mineral and chemical composition of the initial concentrates and their fractions was studied using a complex of methods: optical-mineralogical, mineragraphic, powder X-ray diffraction, energy dispersive X-ray microanalysis (EDXMA), atomic emission spectroscopy and X-ray fluorescence. It has been shown that tungsten concentrates contain sulfur, which is a harmful impurity. Electromagnetic separation makes it possible to improve the quality of tungsten concentrates, remove negative phases and obtain several types of raw materials: grade 3 tungsten-huebnerite concentrate and scheelite carbide concentrate. A magnetite fraction was obtained, which in terms of the amount of iron corresponds to rich iron ores. A monazite-containing fraction enriched in rare earth elements (lanthanum and cerium) can be distinguished.

Ключевые слова: вольфрамовый концентрат, обогащение, гюбнерит, шеелит, РЗЭ

Keywords: tungsten concentrate, enrichment, hübnerite, scheelite, REE.

УДК 553.086

Комарова А. Г., Чикишева Т. А., Прокопьев Е. С., Прокопьев С. А. **Сульфидные минералы из рудопроявлений медистых песчаников Забайкальского края // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 34–38: рис. 4, табл. 2. Библ назв. 6.**

В статье представлены результаты исследования минералого-технологических характеристик руд медистых песчаников. Авторами были установлены вещественный состав, текстурно-структурные характеристики и типы сростков рудных минералов в дроблёной руде. Полученные сведения использованы для определения оптимального режима рудоподготовки и прогнозирования распределения рудных минералов и их сростков по продуктам обогащения.

The article deals with the results of the mineralogical and technological characteristics study of cuprous sandstone ores. The authors have determing the material composition, textural and structural characteristics and intergrowth's types of ore mineral in crushed ore. The obtained data were used to choose the optimal mode of ore preparation and to predict the distribution of ore minerals and their intergrowth in the enrichment products

Ключевые слова: медистые песчаники, рудоподготовка, обогащение.

Keywords: cuprous sandstones, ore preparation, procrssing.

УДК 622.7

Гоптарь А. И., Костромин М. В., Заярный А. А., Воробьёв В. В. **Технология повышения качества кварцевых концентратов, разработанная ООО «ПЛАЗЛЭЙ» // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 39–43: рис. 1, табл. 4. Библ. назв. 6.**

Специалистами ООО «ПЛАЗЛЭЙ» разработана комплексная, универсальная технология основного и глубокого обогащения кварцевого сырья, позволяющая получать кварцевые концентраты высокой чистоты. Низкая себестоимость экологически чистых методов обогащения кварцевой крупки и кратчайшие сроки окупаемости инвестиционных вложений выявляют к такой технологии промышленный интерес.

PLAZLAY OJSC experts have developed an integrated general-purpose technology for basic and deep quartz enrichment used for the production of high-purity quartz concentrates. The technology is of great industrial interest due to the low cost price of environmentally safe quartz grain enrichment methods and a short payback period of investment.

Ключевые слова: высокочистый кварц, кварцевый концентрат, обогащение.

Keywords: high purity quartz, quartz concentrate, processing.

УДК 553.94

Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. **Минералогическая оценка отходов углеобогатительной фабрики «Краснобродская-Коксовая» // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 43–46: рис. 4. Библ. назв. 4.**

В статье показана важность изучения вещественного состава отходов угледобычи перед выбором технологии их обогащения. Авторами изучены отходы флотации углеобогатительной фабрики «Краснобродская – Коксовая», приведены данные о вещественном составе исходного материала, выполнена оценка влияния минералогических особенностей отходов на обогатимость.

The article deals with the importance of studying the material composition of coal mining waste before choosing a technology for their enrichment. The authors studied the flotation waste of the coal concentration plant «Krasnobrodskaya – Koksovaya». Data on the material composition of the starting material are obtained. The effect of mineralogical features of the waste on their dressing was determined.

Ключевые слова: отходы угледобычи, комплексная переработка минерального сырья, угольные шламы, минералого-технологическая оценка сырья, Кузнецкий угольный бассейн.

Keywords: coal mining waste, complex processing of mineral raw materials, coal sludge, mineralogical and technological assessment of raw materials, Kuznetsk coal basin.

УДК 549.02:628.477

Кунилова И. В., Лавриненко А. А. **Ценные примеси в золах сжигания углей Экибастузского угольного бассейна и перспективы их извлечения // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 46–49: табл. 3. Библ. назв. 10.**

С использованием современных методов анализа проведено исследование распределения содержаний ценных микроэлементов в составе золы от сжигания каменных углей Экибастузского угольного бассейна. Проблемы извлечения ценных микроэлементов обусловлены их низкими содержаниями, наличием спекшихся агрегатов частиц различной минеральной природы, а также неравномерностью распределения микроэлементов в золе.

Valuable trace element distribution in ash formed upon burning coal from the Ekibastuz Coal Basin was studied using up-to-date analytical methods. Problems in the recovery of valuable trace elements are due to their low concentrations, the presence of caked aggregates of particles of varied mineral origin and irregular trace element distribution in ash.

Ключевые слова: зола сжигания углей, Экибастузский угольный бассейн, ценные примеси, извлечение, обогащение, гидрометаллургия

Keywords: coal combustion ash, Ekibastuz coal basin, valuable impurities, extraction, enrichment, hydrometallurgy.

УДК 552.574

Прокопьев Е. С., Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А., Прокопьев С. А. **Комплексная переработка отходов угледобычи: вещественный состав и перспектива применения гравитационно-магнитной технологии обогащения // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 50–53: рис. 1, табл. 2. Библ. назв. 4.**

В статье представлены результаты изучения отходов углеобогатительной фабрики, рассматриваемых в качестве вторичного минерального сырья. С учетом выявленных особенностей вещественного состава угольных шламов разработана гравитационно-магнитная технология их обогащения. Технологические испытания обогатимости угольных шламов позволили получить два товарных продукта: угольный концентрат с выходом 25.5%, пригодный для использования в энергетической промышленности и железосодержащий концентрат с долей железа 64.72% для металлургической индустрии.

The results of the study of waste from a Coal Concentration Factory, used as a secondary mineral product, are reported. A gravity magnetic concentration technology was developed with regard for the mineralogical composition of coal slime. Industrial tests of coal slime concentration capacity have yielded two commercial products: coal concentrate with 25.5% yield, which can be used in power engineering, and ferruginous concentrate with an iron concentration of 64.72% for metallurgy.

Ключевые слова: Гравитационно-магнитное обогащение, отходы угледобычи, вещественный состав, минералогический анализ

Keywords: Gravity-magnetic enrichment, coal mining waste, material composition, mineralogical analysis.

УДК 552.574

Кочева Л. С., Котова О. Б., Карманов А. П., Богданович Н. И. **Новые подходы к разработке многофункциональных сорбентов // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 53–56: табл. 3. Библ. назв. 11.**

Рассмотрена возможность создания новых сорбционных материалов на основе карбонизированных промышленных отходов и вторичных продуктов переработки природного сырья для извлечения органических и неорганических токсикантов из водных сред. Изучены явления сорбции-десорбции урана-238 и микотоксина Т-2 на карбонизированных органоминеральных сорбентах. Предложены перспективные направления практического использования разработанных сорбционных углеродных материалов.

The possibility of creating carbonized sorption materials for extracting organic and inorganic toxicants from aqueous media based on industrial waste and secondary products of plant raw materials is considered. The phenomena of sorption–desorption of uranium-238 and mycotoxin T-2 on carbonized organomineral sorbents have been studied. Promising directions for the practical use of the developed sorption carbon materials are proposed.

Ключевые слова: карбонизированные органоминеральные сорбенты, радионуклиды, микотоксины

Keywords: carbonized organomineral sorbents, radionuclides, mycotoxins

УДК 553.086

Щербакова Н. Н., Захаревич А. М., Сержантов В. Г., Вениг С. Б. **Технологический контроль процесса обогащения природного алюмосиликатного сырья с использованием электронной микроскопии // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 57–60: рис. 2. Библ. назв. 1.**

В работе показана эффективность использования автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA II LMU для технологического контроля в процессе обогащения глауконитового песка Белозерского месторождения Саратовской области.

Our study has shown the efficiency of a Tescan MIRA II LMU autoemission scanning electron microscope for technological control of the dressing of glauconite sand from the Belozersk deposits located in the Saratov Oblast.

Ключевые слова: глауконит, сорбент, рельеф, морфология, сканирующий электронный микроскоп.

Keywords: glauconite sand, sorbent, relief, morphology, scanning electron microscope.

УДК 553.89

Кислов Е. В. **Минеральный состав и качественные характеристики аподоломитового нефрита на примере залежи № 1 участка Прозрачный Кавоктинского месторождения, Средне-Витимская горная страна // Технологическая минералогия в оценке качества минеральногосырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 60–63: Библ. назв. 4.**

В статье представлены результаты минералогического изучения аподоломитового нефрита Кавоктинского месторождения. Приведена модель формирования нефрита: развитие по доломиту диопсида, замещение диопсида тремолитом, замещение призматического тремолита спутанно-волокнистым. В отдельных случаях тремолит может развиваться непосредственно по доломиту. В дальнейшем тремолит замещается хлоритом. Граниты обеспечивают теплом метасоматоз. Участие в образовании нефрита амфиболита определяет разнообразие цветовой гаммы нефрита. Роль метаморфизма сводится к тектоническому дроблению, облегчающему проникновение флюидов, и стрессу, обеспечивающему спутанно-волокнистую скрытокристаллическую текстуру нефрита.

The results of the mineralogical study of apodolomitic nephrite from the Kavoktinsk deposit are reported. A nephrite formation model (the evolving of diopside after dolomite, the replacement of diopside by tremolite and the replacement of prismatic tremolite by felted-structured tremolite) is presented. Tremolite is occasionally derived directly from dolomite. Tremolite is then replaced by chlorite. Granites provide heat for metasomatism. The involvement of amphibolites in nephrite formation is responsible for a variety of nephrite colours. Metamorphism is responsible for tectonic crushing, which contributes to fluid penetration, and stress, which provides felted nephrite structure.

Ключевые слова: Кавоктинское месторождение, нефрит, структура, текстура, минеральный состав, причины окраски, модель формирования.

Keywords: Kavokta deposit, jade, structure, texture, mineral composition, causes of color, formation model.

УДК 666.643: 666.32/36

Ильина В. П., Бубнова Т. П., Фролов П. В. **Использование вскрышных пород месторождения Корпанга (Карелия) в качестве кварц-полевошпатового сырья // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 64–69: рис. 3, табл. 1. Библ. назв. 16.**

В статье рассмотрена возможность применения лептитовых гнейсов железорудного месторождения Корпанга (Карелия) в производстве керамических облицовочных материалов. Охарактеризованы свойства полевошпатового концентрата, полученного флотомагнитным обогащением лептитовых гнейсов. Показано, что использование данного концентрата в качестве добавки к керамике, позволяет снизить температуру обжига и увеличить её прочность.

The paper discusses the potential of leptite gneiss from the Korpanga iron deposit, Karelia, as a raw material for the production of facing ceramics. The properties of feldspar concentrate, produced by flotomagnetic enrichment of leptite gneiss, are described. It is shown that the use of the concentrate as additive for ceramics decreases roasting temperature and increases its strength.

Ключевые слова: полевошпатовый концентрат, керамика, обжиг, прочность при изгибе, лептитовые гнейсы.

Keywords: feldspar concentrate, ceramics, firing, bending strength, leptite gneisses.

УДК 549.091.7

Иванова Л. А. **Модифицированные минералы в отделе истории института Земной коры СО РАН // Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2023. С. 69–73: рис. 7. Библ. назв. 5.**

В статье рассматриваются модифицированные минералы в экспозиции отдела истории Института земной коры СО РАН. Приводятся методы и способы облагораживания нефритов, агатов и халцедонов, желто-зеленых бериллов и чароититов различных структурно-морфологических типов, разработанные и проведенные в лаборатории петрологии, геохимии и рудогенеза института.

Modified minerals, exhibited in the History Department at the Institute of the Earth Crust, RAS, Siberian Branch, are discussed. Methods and techniques for ennobling of nephrite, agate, chalcedony, yellow-green beryl and charoitites of various structural and morphological types, developed and tested at the Laboratory of petrology, Geochemistry and Ore Formation of the above institute, are described.

Ключевые слова: экспозиция, модифицированные минералы, нефриты, группа халцедонов, бериллы, чароититы.

Keywords: exposition, modified minerals, nephrites, chalcedony group, beryls, charoitites.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5

Котова О. Б., Ожогина Е. Г. Комплексная оценка твердых полезных ископаемых: междисциплинарность технологической минералогии и современные вызовы 7

Войтеховский Ю. Л. Петрографические структуры и статистики межзерновых контактов 10

Кислов Е. В., Худякова Л. И., Малышев А. В., Гаркушева Н. М. Ультраосновные и основные породы Бурятии – перспективное сырье для глубокой переработки 14

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Фролов П. В. Минеральный потенциал палеопротерозойского ультрамафит-щелочно-карбонатитового интрузивного Тикшеозерско-Елетьозерского комплекса (Северная Карелия, Россия) 18

Корольков А. Т. Экологические последствия разработки аллювиальной россыпи монацита (Восточное Забайкалье) 27

Радомская Т. А., Канева Е. В., Васильева И. Е., Шабанова Е. В., Чуешова А. Г., Белозёрова О. Ю., Митичкин М. А., Айсуева Т. С. Выявление фаз в вольфрамовых концентратах, негативно влияющих на их качество 29

Комарова А. Г., Чикишева Т. А., Прокопьев Е. С., Прокопьев С. А. Сульфидные минералы из рудопроявлений медистых песчаников Забайкальского края 34

Гоптарь А. И., Костромин М. В., Заярный А. А., Воробьёв В. В. Технология повышения качества кварцевых концентратов, разработанная ООО «ПЛАЗЛЭЙ» 39

Чикишева Т. А., Комарова А. Г., Прокопьев С. А., Прокопьев Е. С., Алексеева О. Л. Минералогическая оценка отходов углеобогатительной фабрики «Краснобродская-Коксовая» 43

Кунилова И.В., Лавриненко А. А. Ценные примеси в золах сжигания углей Экибастузского угольного бассейна и перспективы их извлечения 46

Прокопьев Е. С., Турецкая Н. Ю., Чикишева Т. А., Прокопьев С. А. Комплексная переработка отходов угледобычи: вещественный состав и перспектива применения гравитационно-магнитной технологии обогащения 50

Кочева Л. С., Котова О. Б., Карманов А. П., Богданович Н. И. Новые подходы к разработке многофункциональных сорбентов 53

Щербакова Н. Н., Захаревич А. М., Сержантов В. Г., Вениг С. Б. Технологический контроль процесса обогащения природного алюмосиликатного сырья с использованием электронной микроскопии 57

Кислов Е. В. Минеральный состав и качественные характеристики аподоломитового нефрита на примере залежи № 1 участка Прозрачный Кавоктинского месторождения, Средне-Витимская горная страна 60

Ильина В. П., Бубнова Т. П., Фролов П. В. Использование вскрышных пород месторождения Корпанга (Карелия) в качестве кварц-полевошпатового сырья 64

Иванова Л. А. Модифицированные минералы в отделе истории института Земной коры СО РАН 69

АННОТАЦИИ 74

CONTENTS

PREFACE 5

Kotova O. B., Ozhogina E. G. Integrated assessment of hard useful minerals: the interdisciplinary character of technological mineralogy and modern challenges 7

Voitekhovsky Yu. L. Petrographic structures and statistics of intergranular contacts 10

Kislov E. V., Khudyakova L. I., Malyshev A. V., Garkusheva N. M. Buryatia's ultrabasic and Basic rocks as promising raw materials for deep reworking 14

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Frolov P. V. Mineral potential of the Paleoproterozoic Tiksheozero-Yeletozero ultramafic-alkaline-carbonatite intrusive complex, North Karelia, Russia 18

Korolkov A. T. Ecological consequences of the quarrying of an alluvial monazite placer deposit, eastern Trans-Baikal region 27

Radomskaya T. A., Kaneva E. V., Vasilyeva I. E., Shabanova E. V., Chueshova A. G., Belozerova O. Yu., Mitichkin M. A., Aisueva T. S. Detecting phases in tungsten concentrates negatively affecting their quality ... 29

Komarova A.G., Chikisheva T. A., Prokopyev E. S., Prokopyev S. A. Sulphide minerals from cupreous sandstone occurrences in the Trans-Baikal region 34

Goptar A. I., Kostromin M. V., Zayarny A. A., Vorobyov V. V. Technology for increasing the quality of quartz concentrates developed by PLASLAY OJSC 39

Chikisheva T. A., Komarova A. G., Prokopyev S. A., Prokopyev E. S., Alekseyeva O. L. Mineralogical assessment of waste from the Krasnobrodskaya-Koksovaya Coal Concentrate Factory 43

Kunilova I. V., Lavrinenko A. A. Valuable impurities in ash from burning of coal from the Elibastuz Coal Basin and its recovery potential 46

Prokopyev E. S., Turetskaya N. Yu., Chikisheva T. A., Prokopyev S. A. Integrated reworking of coal waste: mineralogical composition and possible application of gravity-magnetic dressing technology 50

Kocheva L. S., Kotova O. B., Karmanov A. P., Bogdanovich N. I. New approaches to multi-functional sorbent production 53

Shcherbakova N. N., Zakarevich A. M., Serzhantov V. G., Venig S. B. Technological control of the concentration of natural alumosilicate raw material using electron microscopy 57

Kislov E. V. Mineral composition and qualitative characteristics of apodolomitic nephrite: case study of body 1 at Prozrachny prospect of the Kavoktinsk deposit, Middle Vitim Highland 60

Ilyina V. P., Bubnova T. P., Frolov P. V. The use of overburden from the Korpanga deposit, Karelia, as quartz-feldspathic raw material 64

Ivanova L. A. Modified minerals from the History Section of the Institute of the Earth Crust, RAS, Siberian Branch 69

ABSTRACTS 74

Научное издание

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сборник статей по материалам докладов
XV Российского семинара по технологической минералогии

Иркутск, 17–18 мая 2023 г.

Печатается по решению Ученого совета
Института геологии КарНЦ РАН

Издано в авторской редакции

Фото на обложке:
Берег озера Байкал в районе пос. Выдрино
(автор *А. Г. Комарова*)

Подписано в печать 20.11.2023. Формат 60×84 1/8.
Гарнитура Times. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 7,0. Усл. печ. л. 9,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 791.

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


РОССИЙСКОЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
КОМИССИЯ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ
XV Российский семинар
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ В ОЦЕНКЕ
КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
17-18 МАЯ 2023 г. | Институт земной коры СО РАН г. Иркутск






СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ








ВЫХОД
LG