

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

Котова О. Б.<sup>1</sup>, Ожогова Е. Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии им. академика Н. П. Юшкина, ФИЦ «Коми НЦ УрО РАН», Сыктывкар

<sup>2</sup> 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 пороодообразующими компонентами являются (%):  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – (19–26),  $\text{SiO}_2$  – (45–47),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – (10–13),  $\text{Na}_2\text{O}$  – (0,85–1),  $\text{K}_2\text{O}$  – (3),  $\text{CaO}$  – (2). Фазовый состав шлаков достаточно пестрый. В легкой фракции плотностью менее 2,9 г/см<sup>3</sup>, 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 («шариками»), 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  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  от 8% до 20% и  $\text{CaO}$  от 1.8% до 4%. В незначительном количестве всегда отмечается  $\text{SO}_3$ . 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.

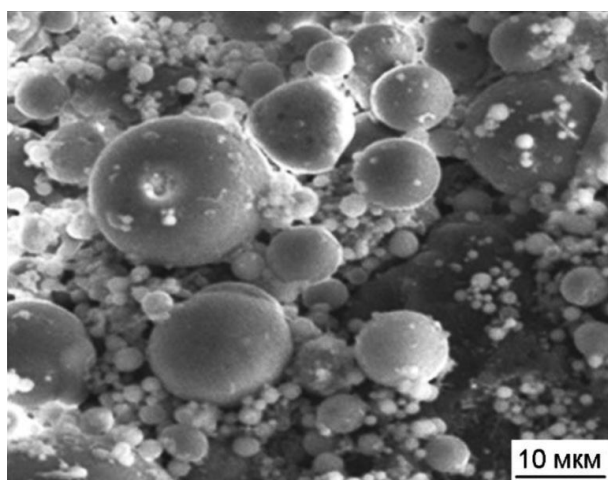
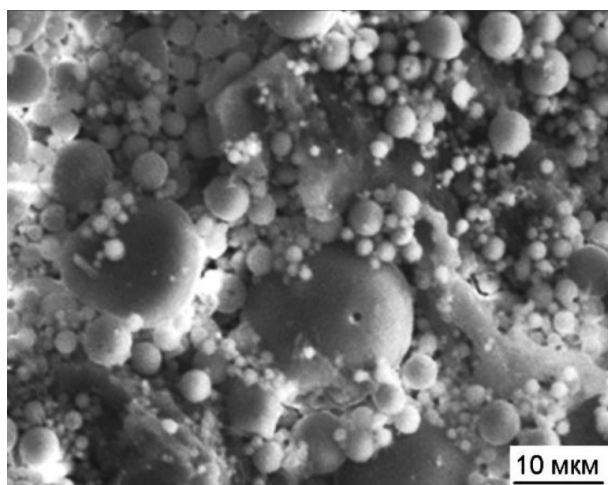


Рис. 1. Полые разноразмерные шаровидные образования. РЭМ

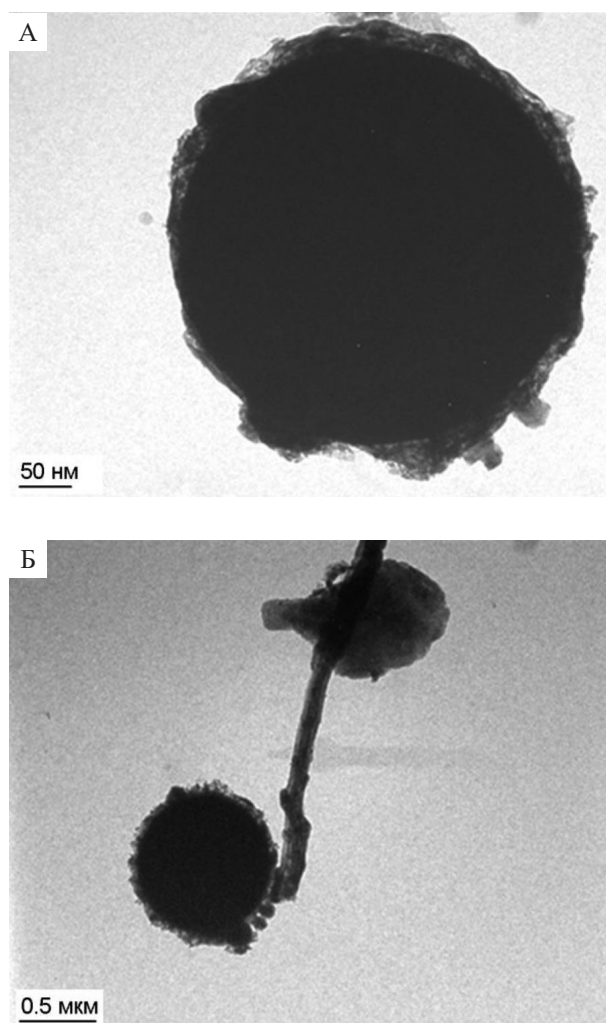


Рис. 2. А – Аморфное округлое образование с волокнистой поверхностью. Б – Аморфное образование с неоднородной поверхностью и графитовая нанотрубка. ПЭМ

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 ИТ-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 (обогащение, 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-Северуральско-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.