



Технологическая минералогия руд стратегических металлов: достижения, проблемы, перспективы

Е. Г. Ожогина¹, О. Б. Котова²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, Москва, Россия
vims-ozhogina@mail.ru

² Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
kotova@geo.komisc.ru

Минералого-аналитические методы и методология прогнозной оценки твердых полезных ископаемых, по существу, определяют целесообразность и тактику освоения сырьевых объектов, при необходимости – возможность замены в первую очередь стратегического сырья другим. На примере стратегических видов полезных ископаемых: марганцевых руд Усинского и бокситов Верхне-Шугорского месторождений – рассмотрены возможности минералогического изучения сложных по составу и строению руд в рамках оценки их качества. Определены проблемы и перспективы технологической минералогии в решении задач минеральных ресурсов стратегических металлов.

Ключевые слова: технологическая минералогия, марганцевые руды, Усинское месторождение, алюминийсодержащие руды, Верхне-Шугорское месторождение, стратегические металлы

Technological mineralogy of strategic metal ores: achievements, problems, prospects

E. G. Ozhogina¹, O. B. Kotova²

¹ Fedorovsky All-Russian scientific-research institute of mineral resources, Moscow, Russia

² Institute of Geology Komi SC UB RAS, Syktывkar, Russia

Mineralogical-analytical methods and methodologies for predictive assessment of solid minerals essentially determine the feasibility and tactics of developing raw materials, and, if necessary, the possibility of replacing, first of all, strategic raw materials with others. Using the example of strategic types of minerals: manganese ores of the Usinsk and bauxite deposits of the Upper Shchugor deposit, the possibilities of mineralogical study of ores with complex composition and structure as part of assessing their quality are considered. The problems and prospects of technological mineralogy in solving problems of mineral resources of strategic metals are identified.

Keywords: technological mineralogy, manganese ores, Usinsk deposit, aluminum-containing ores, Upper Shchugor deposit, strategic metals

Введение

Обеспеченность ресурсами и технологиями их освоения – основные условия развития минерально-сырьевой базы и безопасности России. В первую очередь востребованы полезные ископаемые, составляющие основу материального обеспечения высокотехнологичных отраслей промышленности. Как правило, такие полезные ископаемые относятся к категории стратегических, т. е. обладают уникальными свойствами, которые не могут заменить другие материалы без серьезных ухудшений свойств конечных продуктов. К стратегическим металлам в России относятся уран, марганец, хром, вольфрам, молибден, титан, литий, тантал и другие (О состоянии..., 2022).

Отечественная минерально-сырьевая база черных, легирующих, редких металлов, бокситов, графита, плавленого шпата, которые также относятся к стратегическому сырью, характеризуется резким сокращением запасов богатых руд и вынужденным вовлечением в переработку комплексных полезных

ископаемых, которые нередко относятся к нетрадиционному сырью. Следовательно, необходимы эффективные методы добычи и переработки сырья. Поэтому одним из приоритетных направлений прикладных исследований в области переработки минерального сырья по-прежнему следует считать совершенствование физических и физико-химических методов и методологии прогнозной оценки полезных ископаемых (Инновационные..., 2020). В связи с этим возросла роль технологической минералогии, методы которой позволяют проводить оценку полезных ископаемых на всех стадиях геолого-разведочных работ, прогнозировать поведение руд и горных пород в технологических процессах и качество ожидаемых продуктов (Вайсберг, Козлов, 2014; Ожогина, Котова, 2024).

Возможности технологической минералогии в последние годы значительно расширились благодаря внедрению в прикладные исследования высокоразрешающих многофункциональных приборов, технологий испытаний, заимствованных из смежных областей, и

Для цитирования: Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Достижения, проблемы, перспективы технологической минералогии руд стратегических металлов на примерах марганцевых и алюминиевых руд // Вестник геонаук. 2024. 10(358). С. 28–34. DOI: 10.19110/geov.2024.10.3

For citation: Ozhogina E. G., Kotova O. B. Technological mineralogy of strategic metal ores: achievements, problems, prospects using manganese and aluminum ores as examples. Vestnik of Geosciences, 2024, 10(358), pp. 28–34, doi: 10.19110/geov.2024.10.3



их разумному сочетанию с традиционными методами минералогического анализа, эффективных способов разупрочнения минералов в руде (например, энергетические воздействия различной природы). Необходимо отметить и успехи минералогов, физиков, технологов, химиков, работающих совместно в области изучения природных и техногенных тонкодисперсных систем, реальные особенности которых уникальны и вносят существенный вклад в процессы обогащения руд (Christy et al., Иванова и др., 2015; Нохрина и др., 2021).

Природные особенности сырья, в большинстве своем комплексного, отличающегося сложным сочетанием текстурно-структурных характеристик, обусловленных генезисом и вторичными изменениями, требуют привлечения расширенного комплекса методов анализа для получения достоверной минералогической информации. Следовательно, необходимо разрабатывать новые и совершенствовать существующие приемы, операции и методы анализа (Kotova et al., 2022).

Одним из способов преодоления дефицита стратегических металлов, вызванного низким качеством балансовых руд, является внедрение новых природоподобных технологий, включая рациональные технологические схемы обогащения и технологического передела (Наумов и др., 2022). Основу таких технологий составляют механизмы природных процессов, к управлению которыми привлечены интеграционные процессы прорывных научных направлений: нано-, био-, цифровых и др. Например, изучение явлений в системе «минерал — среда» позволило разработать новые технологии прогнозной оценки качества минерального сырья и горнопромышленных отходов, заключающиеся в интеграции минералогических методов анализа с развитием экспериментальных работ в области структурных, фазовых и химических трансформаций минералов при различных воздействиях на них в процессах подготовки и обогащения (Ozhogina, Kotova, 2019).

Основная цель работы — совершенствование методов технологической минералогии и методологии прогнозной оценки твердых полезных ископаемых (на примере марганцевых руд Усинского и алюминиевых руд Верхне-Шугорского месторождений).

Объекты исследования

Практический интерес уже на протяжении многих десятилетий представляют марганцевые руды Усинского месторождения, самого крупного в стране месторождения карбонатных марганцевых руд. Известны многочисленные работы, касающиеся различных аспектов изучения этих руд. Однако промышленное освоение Усинского месторождения до сих пор не осуществляется.

Карбонатные марганцевые руды, выявленные на западном крыле Усинской синклинали структуры, приурочены к нижнекембрийским отложениям, сформированным доломитами, известняками, глинистыми и углистыми сланцами, которые осложнены разрывными нарушениями и прорваны дайками диабазов. Руды представляют собой переслаивание родохритовых, манганокальцитовых руд, известняков и сланцев, что определяет их морфоструктурные особенности.

Республика Коми, обладая значительными запасами бокситов, сегодня рассматривается в качестве перспективного района развития ресурсной базы алюминия. Важное значение для региона имеет введение в эксплуатацию открытым способом Верхне-Шугорского месторождения. Известно, что бокситы Северной залежи образовались по полевошпато-карбонатным метасоматитам и относятся к редкометалльно-глиноземистой субформации, бокситы Южной залежи сформировались по сланцево-карбонатным породам и метамергелям. Рудные тела состоят, как правило, из одного пласта и приурочены к средней части разреза бокситоносной толщи. Следует подчеркнуть, что бокситы этого месторождения рассматриваются в качестве бокситов металлургического сорта, а также представляют практический интерес как комплексные.

Методы исследования

Для достоверной прогнозной минералого-технологической оценки полезных ископаемых необходима максимально полная информация не только о руде в целом, но и о слагающих ее минералах, в первую очередь представляющих промышленный интерес и подлежащих извлечению. Это определяет необходимость всестороннего изучения руды и (или) горной породы комплексом методов химического и минералогического анализов. В практике изучения вещественного состава твердых полезных ископаемых сегодня используются различные физические и физико-химические методы, сочетание которых, последовательность применения и объем анализов определяется конкретными задачами.

В наших исследованиях были задействованы традиционные методы оптической микроскопии: оптико-минералогический, оптико-петрографический, минерографический анализы (световые микроскопы Olympus BS51, Olympus BS 53 (Япония), стереомикроскоп высшего класса Leica MZ12,5 (Германия)). Качественный и количественный минералогические анализы осуществлялись рентгенографическим методом (рентгеновские дифрактометры Shimadzu XRD-6000 (Япония) и X PertPRO (Нидерланды)). Для проведения электронно-микроскопических исследований, включая рентгеноспектральный микроанализ, использовались сканирующие электронные микроскопы ZEM 15 (Китай), Tescan VEGA-3 (Словакия). Химический состав руд и вмещающих пород определялся аналитическими методами анализа: рентгенофлуоресцентным, индуктивно связанным, плазменным, масс-спектрометрическим.

Исследования проводились в соответствии с методическими документами научных советов по методам минералогических и аналитических исследований (НСОММИ и НСАМ).

Методология комплексной оценки минерального сырья требует исключительно количественных характеристик (минеральный и гранулярный состав, морфометрические параметры минералов, определяющие степень раскрываемости и коэффициент их раскрытия, реальный элементный состав, физические свойства), которые позволяют с высокой степенью надежности прогнозировать технологию его переработки и качество конечных продуктов. Поэтому в комплексе

минералогических методов анализа уверенно лидируют количественные методы (рентгенографический, оптико-минералогический, оптико-геометрический), позволяющие получить достоверную, сопоставимую, метрологически оцененную информацию.

В настоящее время метрологическое сопровождение минералогических работ (метрологический контроль) является самостоятельным направлением прикладной, в том числе технологической минералогии, со своими целями, структурой и основой метрологического обеспечения, с соблюдением требований системы контроля качества минералогических работ, включая регламенты контроля качества измерений, регламенты методик (создание и внедрение) количественного минералогического анализа, массовых (рутинных) анализов руд, горных пород, техногенных образований, включая полуколичественные методы и формирование средств метрологического контроля.

Работы в области метрологического сопровождения минералогических работ ведутся достаточно активно. Разрабатываются новые методические документы, актуализируются существующие документы, в которых приведены единые требования к точности измерений, к достоверности данных. Приоритетными сегодня стали научно-обоснованные документы по комплексу методов анализа конкретных полезных ископаемых. В последние годы в практику минералогических исследований активно внедряются межлабораторные сличительные испытания (МСИ), являющиеся инструментом оценки достоверности результатов анализов в отдельно взятой организации (лаборатории) и дающие наглядное представление о реальной точности используемых методик измерений.

Следует отметить, что минералогические работы в необходимом и достаточном объеме при прогнозной оценке качества сырья и его технологических испытаниях выполняются далеко не во всех организациях. Нередко геолого-разведочные, в том числе технологические, работы сопровождаются только аналитическими (химическими) данными, не позволяющими получить объективную полноценную информацию о руде (горной породе) в целом: минеральном составе, извлекаемых минералах, их взаимоотношениях и технологических свойствах, определяющих методы обогащения.

Результаты исследования и их обсуждение

Марганцевые руды. Карбонатные марганцевые руды характеризуются сложными взаимоотношениями слагающих их минеральных агрегатов и разновременными минеральными ассоциациями, что определяет их текстурно-структурный рисунок. Преобладающие первичные слоистые текстуры руд (неравномерно-, волнисто-, прерывисто-, линзовидно-слоистые текстуры) сочетаются с наложенными вкрапленными и прожилковыми текстурами. Структура руд неравномерно кристаллическая (от скрыто-до среднекристаллической) пан- и гипидиоморфнозернистая. Иногда отмечаются участки крупнокристаллического строения. Окисление карбонатных руд определяет появление текстур замещения: корковых, колломорфных, прожилковых.

Руды отличаются переменным содержанием марганца ($MnO_{\text{общ}}$ 22.12–32.13 %), зависящим прежде всего от соотношения в них марганцевых минералов, образующих собственные минеральные фазы — родохрозит, манганокальцит, силикаты и гидроксиды марганца, присутствующие в подчиненном количестве. Железо ($Fe_2O_{3\text{общ}}$) связано с пиритом, пирротинном и входит в виде изоморфной примеси в кристаллическую структуру марганцевых минералов. Высокое содержание CaO (19.71–22.20 %) определяется присутствием собственных минеральных фаз (кальцит, манганокальцит, доломит), а также пироксмангита, тодорокита, апатита и стильпномелана. Кремнезем (11.73–17.32 %) представлен кварцем, а также входит в состав силикатов марганца и слоистых силикатов. Содержание фосфора (P_2O_5) в руде достигает 0.32 %, минеральными формами фосфора являются апатит и кингсмаунтит.

Карбонатные руды полиминеральные, отличаются переменным содержанием в первую очередь минералов марганца. Главными рудными минералами являются карбонаты марганца: родохрозит (13–32 %), манганокальцит (15–24 %), марганцовистый кальцит и кальцит (15–28 %). Присутствие минералов непрерывного изоморфного ряда «кальцит – марганцовистый – кальцит – манганокальцит – Ca – родохрозит», которые весьма тесно ассоциируют между собой, определяет неоднородное строение карбонатных агрегатов и варьирующее содержание в них марганца, что подтверждено методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 1, а, б). Иногда отмечается достаточно высокое содержание (до 15 %) силикатов марганца (тефроит, бементит, пироксмангит), в основном образующих включения в карбонатах марганца, от которых невозможно полностью избавиться методами механического обогащения. При этом доля марганца непосредственно в карбонатных агрегатах не уменьшается. Вторичная марганцевая минерализация, развитая крайне неравномерно, связана с оксидами и гидроксидами марганца (псиломеланом, тодорокитом, рансьеитом). В рудах практически всегда в переменных количествах присутствуют кварц, стильпномелан, септохлорит, хлорит, тальк, пирротин, пирит, относящиеся к категории второстепенных минералов. Тем не менее эти минералы принимают активное участие в образовании гетерогенных существенно карбонатных агрегатов (рис. 1, с, d). Фосфорсодержащим минералом является аксессуарный апатит, образующий тонкие включения в родохрозите, реже манганокальците и кингсмаунтите, идентифицированный в окисленном родохрозите методом микродифракции (просвечивающая электронная микроскопия).

Минералогические особенности руд однозначно свидетельствуют об их трудной обогатимости. В гетерогенных карбонатных агрегатах родохрозит обладает высокой степенью изрезанности границ, независимо от крупности зерен, что хорошо видно на рис. 1, d. Это определяет прочность сростков родохрозита с манганокальцитом, кальцитом, иногда с силикатами марганца и говорит о невозможности селективного выделения конкретных карбонатов марганца механическими методами обогащения. Обнадеживающие результаты, полученные при рентгенорадиометрической сепарации карбонатных руд, позволяют перспективы

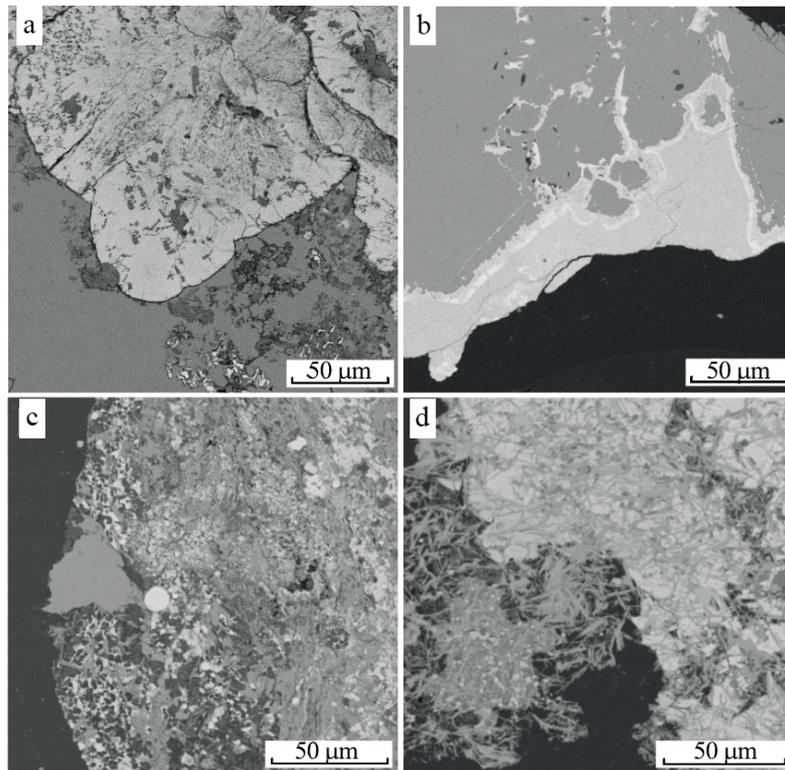


Рис. 1. Взаимоотношение марганцевых минералов в агрегатах (a, b): a — родохрозит (светло-серое) кальцит (серое), b — родохрозит (светло-серое), мanganокальцит (серое), псиломелан (белое), c — полиминеральный хлорит-родохрозит-мanganокальцитовый агрегат; d — полиминеральный агрегат существенно родохрозитового состава (справа), агрегат родохрозит-хлоритового состава (слева). СЭМ

Fig. 1. Relationships of manganese minerals in aggregates (a, b): a — rhodochrosite (light gray) calcite (gray), b — rhodochrosite (light gray), manganocalcite (gray), psilomelane (white), c — polymineral chlorite–rhodochrosite–manganocalcite aggregate; d — polymineral aggregate of essentially rhodochrosite composition (right), aggregate of rhodochrosite-chlorite composition (left). SEM

обогащения этих руд связывать именно с этим методом.

Бокситовые руды. Бокситы Верхне-Шугорского месторождения отличаются весьма сложным текстурно-структурным рисунком, обусловленным различным сочетанием структур минеральных агрегатов и взаимоотношением последних. При доминирующей роли пятнистых разноокрашенных бокситов фиксируются участки руды массивной, псевдооолитовой, брекчиевидной, конгломератовидной, вкрапленной (бобовой), колломорфной текстур. Структура — скрытокристаллическая (афанитовая и метаколлоидная).

Бокситы имеют переменный химический состав. Содержание главных рудообразующих компонентов — кремнезема и глинозема — варьирует в широких пределах, соответственно от 0.6 до 49.45 % и от 21.9 до 82.3 %; они входят в состав главных рудных и глинистых минералов. По содержанию железа (0.6–47.0 % Fe_2O_3), образующего собственные минеральные фазы (гетит, гидрогетит, гематит), четко выделяются три типа бокситов: низко-, средне- и высокожелезистые (НЖБ, СЖБ и ВЖБ). Изменение кремниевого модуля от 6.5 до 100, видимо, связано с процессами бокситизации и дебокситизации (шамотизации) в различных слоях латеритного профиля. Титан (0.8–3.3 % TiO_2) образует собственную фазу — рутил. Для руды типично повышенное содержание редких металлов, сумма которых составляет 0.47 %. При этом их самостоятельных фаз не обнаружено. Вероятно, они присутствуют в адсор-

бированной форме и связаны с оксидами и гидроксидами железа и марганца. По совокупности минералогических признаков — минеральному составу и текстурно-структурным характеристикам — выделено три минеральных типа руд: гематит-бемитовый, каолинит-диаспор-бемитовый и бемитовый.

Главным рудным минералом в бокситах всех типов является бемит (45–81 %), максимальное содержание которого отмечается в низкожелезистых бемитовых рудах. В среднежелезистых каолинит-диаспор-бемитовых бокситах к категории главных рудных минералов относится диаспор (15–20 %), в остальных бокситах содержание его не превышает 8 %, и встречается он не повсеместно. В подчиненном количестве присутствует гиббсит (0–6 %). Содержание гематита изменяется в значительных пределах, на его долю приходится в НЖБ — 4–5 %, СЖБ — 14–17 % и ВЖБ — 19–47 %. Гетит отмечается не всегда, содержание его фиксируется на уровне первых процентов и только в СЖБ его количество достигает 8 %. Иногда в бокситах наблюдается рутил (до 4 %), приуроченный преимущественно к гетит-гематитовым агрегатам.

Бемит присутствует в основном в виде тонкодисперсных агрегатов, не всегда имеющих четкие границы, сформированных плотно упакованными зернами пластинчатой формы. В тесной ассоциации с бемитом обычно встречается диаспор, индивиды которого имеют таблитчатую, пластинчатую или неправильную формы. Значительно реже в таких агрегатах методом

рентгенографического анализа идентифицируется гиббсит. В тесной ассоциации с минералами алюминия встречаются минералы железа (гетит, гидрогетит и гематит), отличающиеся, как правило, различной формой минеральных зерен и агрегатов (рис. 2, а, б), что в значительной степени усложняет текстурный рисунок в целом. Интересной особенностью полиминеральных существенно бемитовых агрегатов является сочетание микростроения формирующих их минералов: листоватого, чешуйчатого, тонкопластинчатого, лучистого, ажурного, концентрически-зонального (рис. 2, с–е), указывающее на то, что селективно выделить конкретные минералы будет невозможно.

Минералы железа участвуют в формировании полиминеральных агрегатов переменного состава, а также встречаются в виде индивидуализированных зерен или мономинеральных агрегатов. Гематит присутствует в виде зерен ромбоэдрической, таблитчатой и пластинчатой форм с неровными сглаженными очертаниями, нередко с четким зональным строением. В колломорфных образованиях гематит образует тонкие концентры (концентрические зоны). Гетит и гидрогетит встречаются преимущественно в полиминеральных агрегатах в тесном срастании с минералами алюминия без явных границ между зернами. Также отмечаются существенно гетитовые агрегаты с явными элементами концентрически-зонального сложения, иногда скорлуповатого. Строение метаколлоидное.

Выявленные минералогические особенности бокситов, их полиминеральный переменный состав и ха-

рактер граничных взаимоотношений минералов определяют их трудную обогатимость. Извлечение минералов алюминия, железа и, возможно, титана представляет сложную задачу, что в первую очередь связано с природными текстурно-структурными особенностями бокситов, не позволяющими достичь полноценного раскрытия ценных минералов. В то же время кристаллохимические особенности минералов железа, распределение Fe^{2+} и Fe^{3+} по структурным позициям, определяющим магнитные свойства минералов, позволяют говорить о методах и подходах к изменению этих свойств. В данном случае можно рассматривать магнетизирующий обжиг для перевода оксигидроксидов железа (гетита и гематита) в магнетит и маггемит (Ожогина, Котова, 2024).

Повышенное содержание редких металлов в бокситах, несомненно, говорит об их комплексности. Сегодня первоочередной задачей в этой части оценки бокситов является выявление формы их нахождения. Большинство исследователей считают, что они присутствуют в сорбционной форме в тонкодисперсной полиминеральной матрице. Для подтверждения этого требуются прецизионные минералогические исследования. Только после этого можно однозначно говорить о технологиях извлечения редких металлов, например сорбционных. Следует отметить, что достоверная минералогическая информация позволит успешно решить вопросы утилизации отходов добычи и переработки бокситовых объектов, в которых отмечается значительное количество металла.

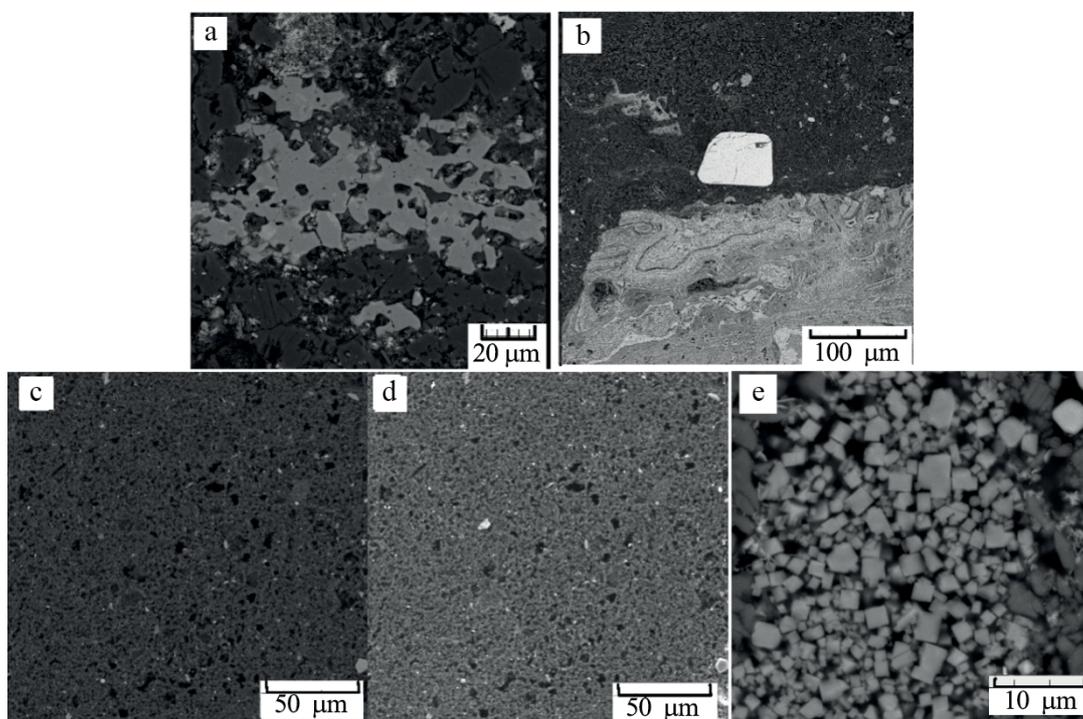


Рис. 2. Полиминеральные агрегаты, сформированные минералами алюминия и железа (а, б): а — гематит; б — скрытокристаллическая темно-серая верхняя часть — существенно бемитовая, серая колломорфная — гидроксиды железа, светло-серая — циркон; с, d — пористые агрегаты, имеющие тонкопластинчатое, тонкочешуйчатое лучистое микростроение: с — изображение в отраженных электронах, d — изображение во вторичных электронах; е — бемит пластинчатого микростроения, ассоциирующий с диаспором таблитчатого микростроения (режим отраженных электронов). СЭМ

Fig. 2. Polymineral aggregates formed by aluminum and iron minerals (a, b): a — hematite; b — cryptocrystalline dark gray upper part — essentially boehmite, gray colloform — iron hydroxides, light gray — zircon; c — porous aggregates with thin-plate, thin-flake radiant microstructure image in backscattered electrons, d — image in secondary electrons; e — boehmite of plate microstructure, associated with diasporite of tabular microstructure (backscattered electron mode). SEM



В связи с ограниченностью качественного бокситового сырья в России, относящегося к категории стратегического (О состоянии..., 2022), рассматривается возможность использовать в качестве источника алюминия альтернативные полезные ископаемые (нефелины, каолины, кианиты и др.) (Лихникевич и др., 2023). Например, каолины можно отнести к бедным рудам для производства глинозема (40 % Al_2O_3 и 57 % SiO_2), которые, однако, по содержанию глинозема и кремниевому модулю превосходят нефелиновые руды. Поэтому минералого-технологическая оценка каолиновых глин месторождений бокситов Среднего Тимана позволит определить эффективные технологии извлечения алюминия. В то же время не стоит забывать о многоплановом использовании каолинов в других отраслях промышленности (Kotova, 2023; Голубева и др. 2023).

Заключение

На примере труднообогатимых руд марганца Усинского и алюминия Верхне-Щугорского месторождений, относящихся к категории стратегических полезных ископаемых, показано, что их глубокое минералогическое изучение комплексами методов позволило получить достоверную информацию о составе и строении этих руд, положенную в основу прогнозной оценки их качества. Владая максимально полными сведениями о минералогических особенностях этих руд, можно разрабатывать новые и совершенствовать существующие технологии переработки.

Для обеспечения технологической независимости России требуется создание полного цикла производства продукции — от сырья до конечного продукта. Совершенно очевидно, что в ближайшем будущем потребуется прогнозная оценка качества ряда полезных ископаемых, прежде всего стратегических, отечественные месторождения которых сегодня по разным причинам не осваиваются. Следовательно, необходимым и обязательным условием геологического изучения и промышленного освоения сырьевых объектов будут минералогические исследования, направленные на расширение минерально-сырьевой базы страны.

Природные особенности твердых полезных ископаемых, в большинстве своем отличающихся комплексностью, сложными морфоструктурными характеристиками, обусловленными их генезисом и дальнейшими преобразованиями, определяют необходимость применения расширенного комплекса методов минералогического анализа, метрологически оцененных, позволяющих получать достоверную информацию об объекте. Значит, будут разрабатываться новые и совершенствоваться существующие приемы, операции, методы анализа применительно к конкретным рудам и горным породам. При этом однозначно повысится роль прецизионных исследований, позволяющих на более высоком уровне выявлять, изучать и оценивать минералогические особенности полезных ископаемых, влияющих на их обогатимость.

Работа в части исследования бокситов Верхне-Щугорского месторождения выполнена в рамках государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН и с использованием оборудования ЦКП «Геонаука».

Литература / References

- Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С.79–84.
- Weisberg L. A., Kozlov A. P. Priority areas of research in the field of processing mineral raw materials. Ore dressing, 2014, No. 2, pp. 79–84. (in Russian)
- Голубева О. Ю. и др. Наноархитектоника слоистых алюмосиликатов как основа создания новых функциональных материалов для решения актуальных задач медицины и экологии // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 1. С. 74–80. DOI:10.37614/2949-1215
- Golubeva O. Yu. et al. Nanoarchitectonics of layered aluminosilicates as a basis for creating new functional materials for solving urgent problems of medicine and ecology Transactions of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical sciences, 2023, V. 14, No. 1, pp. 74–80. DOI: 10.37614/2949-1215 (in Russian)
- Иванова М. В., Астахова Ю. М., Сорокин Е. М. и др. Особенности раскрытия минералов железа в рудах Серовского месторождения // Разведка и охрана недр. 2015. № 3. С. 34–41.
- Ivanova M. V., Astakhova Yu. M., Sorokin E. M., et al. Features of the disclosure of iron minerals in the ores of the Serovskoye deposit. Exploration and protection of subsoil, 2015, No. 3, pp. 34–41. (in Russian)
- Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2020): Материалы междунар. конференции. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020.
- Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials (Plaksin Readings — 2020): Proceedings of the International Conference. Apatity: FRC KSC RAS, 2020. (in Russian)
- Лихникевич Е. Г., Пермякова Н. А., Рогожин А. А. Отечественное каолиновое сырье: технологические перспективы // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2023). М., 2023. С. 62–64.
- Likhnikovich E. G., Permyakova N. A., Rogozhin A. A. Domestic kaolin raw materials: technological prospects. Modern problems of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings — 2023). Moscow, 2023, pp. 62–64. (in Russian)
- Наумов В. А., Наумова О. Б., Брюхов В. Н., Голдырев В. В., Голдырев В. Н., Плюснина К. И. Природоподобные технологии на пути освоения техногенно-минеральных образований // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского: Сб. науч. ст. Пермь: ПГНИУ. 2022. Вып. 25. С. 181–187.
- Naumov V. A., Naumova O. B., Bryukhov V. N., Goldyrev V. V., Goldyrev V. N., Plyusnina K. I. Nature-like technologies for the development of technogenic mineral formations. Problems of mineralogy, petrography and metallogeny. Scientific readings in memory of P. N. Chirvinsky: collection of scientific articles. Perm: Perm State National Research University. 2022, 25, pp. 181–187. (in Russian)
- Нохрина О. И., Рожихина И. Д., Рыбенко И. А., Голодова М. А., Израильский А. О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд //



- Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 273–281. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>
- Nokhrina O. I., Rozhikhina I. D., Rybenko I. A., Golodova M. A., Izrail'sky A. O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ores. *News of universities. Ferrous metallurgy*, 2021, V. 64, No. 4, pp. 273–281. (in Russian)
- Ожогина Е. Г., Котова О. Б. Достижения, проблемы, перспективы технологической минералогии руд стратегических металлов // Плаксинские чтения — 2020: Материалы междунар. конф. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2024. С. 54–56.
- Ozhogina E. G., Kotova O. B. Achievements, problems, prospects of technological mineralogy of strategic metal ores. (Plaksin Readings — 2020): Proceedings of the International Conference. Apatity: FRC KSC RAS, 2024, pp. 54–56. (in Russian)
- О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году: Государственный доклад. М.: ВИМС, 2022. 623 с.
- On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2021: State report. Moscow: VIMS, 2022, 623 p. (in Russian)
- Christy, A. G., Mills, S. J., Kampf, A. R., Houseley, R. M., Thorne, B., and Marty, J. (2016) The relationship between mineral composition, crystal structure and paragenetic sequence: the case of secondary Te mineralization at the Bird Nest druft, Otto Mountain, California, USA. *Mineralogical Magazine*, 80, 291–310.
- Kotova O. B., Ustyugov V. A., Sun Shiyong, Ponaryadov A. V. Mullite production: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process // *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. P.129-135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43
- Ozhogina E. G., Kotova O. B. How technological mineralogy can solve problems of integrated processing of mineral raw, Sustainable Development of Mountain Territories, 2021, №2 (48), pp. 170–179. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-170-178
- Ozhogina, E. G., Kotova, O. B. New methods of mineral processing and technology for the progress of sustainability in complex ore treatment // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. 2019. Moscow. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum (2-s2.0-85059377649) P. 32–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37216799>.
- Razmyslov I. N., Kotova O. B., Silaev V. I., Rostovtsev V. I., Kiseleva D. V., and Kondratyev S. A. Microphaseheterogenization of ferrous bauxites as a result of radiation and heat treatment, *J. Min. Sci.*, 2019, vol. 54, no. 5, pp. 138–153. DOI:10.1134/S1062739119056185
- Vakhrushev A. V., Kotova O. B., Lyubinsky I. F. Bauxites of the Timan region: new methods and means of complex processing. *Exploration and protection of subsurface resources*. 2009, No. 11, pp. 53–57.

Поступила в редакцию / Received 18.09.2024