ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТХОДЫ: МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Е. Г. Ожогина¹, О. Б. Котова², О. А. Якушина¹

¹ВИМС им. Н. М. Федоровского, Москва

²Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар

Вынужденное хранение огромного количества отходов, их удаление в отвалы, экологические риски свидетельствуют о неблагоприятном положении в вопросе комплексного использования минерального сырья. В статье эта проблема рассмотрена с позиции технологической минералогии в рамках «Стратегии развития промышленности России по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года». Для разных видов отходов используется индивидуальный комплекс методов минералогического анализа. Показано, что для горнопромышленных отходов присущи минералогические характеристики (минеральный и (или) фазовый состав, форма нахождения полезного компонента, морфоструктурные особенности и характер распределения, реальный состав и строение), определяющие в дальнейшем стратегию и тактику его вторичного использования.

Ключевые слова: горнопромышленные отходы, технологическая минералогия, минералогические характеристики, технологии утилизации.

MINING INDUSTRIAL WASTE: MINERALOGICAL FEATURES

E. G. Ozhogina¹, O. B. Kotova², O. A. Yakushina¹

¹VIMS named after N. M. Fedorovsky, Moscow

²Institute of Geology, Komi SC UB RAS, Syktывkar

Forced storage of a huge amount of wastes, their removal to dumps, environmental risks testify to a very unfavorable situation in the complex use of mineral raw. Our paper considers this problem from the point of view of technological mineralogy within the framework of «Strategy for the Development of Russian Industry for Processing, Utilizing and Neutralizing Production and Consumption Wastes up to 2030». An individual complex of mineralogical analysis methods is used for each type of the wastes. We show that mineralogical characteristics (mineral and (or) phase composition, mode of occurrence of a useful component, morphostructural features and character of distribution, real composition and structure) are inherent for the mining wastes, which subsequently determine the strategy and tactics of its secondary use.

Keywords: mining wastes, technological mineralogy, mineralogical characteristics, recycling technologies.

Введение

Переработка отходов является «отдельной масштабной задачей для нашей промышленности ... По сути, речь идет о создании новой отрасли, которая позволит вовлекать во вторичный оборот дополнительные ресурсы и, конечно, должна снизить объемы захоронений таких промышленных отходов, поскольку это тоже часто приводит к неблагоприятным экологическим последствиям» [5].

Техногенное сырье в виде отходов добычи и переработки руд и горных пород всегда по составу и особенностям строения отличается от природных полезных ископаемых. Вскрышные, вмещающие породы, отходы сухой переработки сырья по составу и свойствам в определенной степени можно сопоставлять с природными аналогами и в большинстве случаев использовать в тех же направлениях, что и природные. Отходы металлургических, теплоэнергетических, химических производств (шлаки, шламы, золошлаки, горелые породы, пиритные огарки и пр.) существенно отличаются от природного сырья.

Минералогическими характеристиками техногенного сырья, в том числе горнопромышленных отходов, являются гранулярный состав, сложные взаимоотношения минеральных и (или) техногенных фаз, в том числе наличие эвтектических колоний или структур распада твердых растворов, незначительное количество одного или нескольких полезных минералов, полиминеральные (полифазные) агрегаты, присутствие минералов изоморфных рядов и политипных модифика-

ций, вторичные изменения, связанные в основном с процессами гипергенеза.

Изучение состава, строения и технологических свойств горнопромышленных отходов, базирующееся на современном научном, методическом, техническом и инструментально-аппаратурном обеспечении исследований техногенного сырья, позволяет прогнозировать возможность вовлечения его во вторичную переработку, включая ликвидацию экологических последствий промышленной переработки [6]. Получить необходимую минералогическую информацию возможно комплексом минерало-аналитических методов. Для разных видов отходов используется индивидуальный комплекс методов минералогического анализа, позволяющий получать полную и достоверную информацию, включающую сведения о фазовом составе техногенных образований, в том числе форме нахождения полезных элементов, гранулярном составе, морфометрических параметрах, характере локализации конкретных фаз.

Следует отметить, что при минералогическом изучении, например, вскрышных и вмещающих пород, как правило, руководствуются методическими документами, разработанными для природного минерального сырья. В то время как специальных методик минералогического анализа большей части горнопромышленных отходов (шлаки, шламы, отходы мокрых способов обогащения, золошлаки и пр.) не существует. Как правило, исследование таких объектов носит междисциплинарный характер, обусловленный разумным сочетанием методов анализа, заимствованных из различных областей

знаний и адаптированных к решению минералого-технологических и минералого-экологических задач.

Наиболее распространенный способ утилизации отходов — получение материальных ресурсов для индустрии. Например, в работе [2, 9] показана возможность получения из золы уноса ТЭЦ (Печорский угольный бассейн) сорбентов типа цеолитов по комбинированной магнитно-термохимической схеме. Изучение минерального состава продуктов на различных стадиях синтеза цеолитов проводилось комплексом минералогических методов (рентгенографический, электронно-микроскопический и микрорентгеноспектральный). Синтезированы несколько новых видов цеолитов, которые не были получены ранее из этого типа сырья: анальцим, цеолиты типа фожазита и жисмондина, которые оказались активными сорбентами для тяжелых металлов и радиоактивных элементов (рис. 1) [10].

Основной объем горнопромышленных отходов — это отходы горнодобывающих производств. Среди отходов перерабатывающих производств лидирующее положение занимают металлургические шлаки, в которых сосредоточено значительное количество полезных компонентов, нередко превышающее их содержание в природных рудах. Поэтому в последнее время шлаки представляют практический интерес, так как возможность извлечения из них рудных фаз может способствовать расширению минерально-сырьевой базы благородных, цветных, редких, черных металлов.

Основной целью статьи является выявление в разнотипных горнопромышленных отходах особенностей минералогических характеристик (минеральный и(или) фазовый состав, форма нахождения полезного компонента, морфоструктурные особенности и характер распределения, реальный состав и строение), определяющих в дальнейшем стратегию и тактику их вторичного использования.

Объекты и методы исследования

В качестве примера минералогического изучения горнопромышленных отходов с точки зрения их технологической оценки рассмотрим техногенные отложения хвостохранилища железорудной фабрики ОАО «Краснокаменское рудоуправление», представленные отходами переработки руд месторождений Маргоз, Одинокое, Рудный каскад [1, 7, 8] и отвальные никельсодержащие шлаки Южного Урала [4]. Исследования проведены комплексом методов минералогического анализа (оптическая и электронная микроскопия, рентгенографический, рентгенофотографический, микро-рентгеноспектральный анализы) в соответствии с методическими документами Научного совета по методам минералогических исследований (НСОММИ).

Результаты и обсуждение

Лежалые хвосты железорудной фабрики представлены отложениями пляжной зоны (рыхлый песчано-глинистый материал) и пруда-отстойника (плотные илистые образования) (рис. 2, а, б).

Главным полезным элементом является железо Fe (27.7—30.4 %) Породообразующие компоненты представлены SiO_2 (39.5—41 %), Al_2O_3 (5.99—9 %) и MgO (0.28—0.59 %).

В хвостах четко выделяются рудная и количественно преобладающая нерудная составляющие. В отмытых пробах явно доминируют рудные минералы и агрегаты (рис. 2, с, д).

Типичный характер взаимоотношения рудообразующих фаз в полиминеральных агрегатах формирующих пробы, прослеживается на их томограммах (рис. 3). В агрегатах преобладают порообразующие минералы, образуя матрицу, в которой неравномерно распределены рудные минералы, что характерно для техногенных отходов данной категории. Подобное распре-

Рис. 1. Продукты гидротермальной реакции, полученные при температурах 95 °C (A, B), 140 °C (C, D) и 180 °C (E, F): A — скопление кристаллов цеолита X; B — кристаллы цеолитов X и P; C — единственный кристалл цеолита P; D — кристаллы анальцима и цеолита P; E — единственный кристалл анальцима; F — скопление кристаллов канкринита

Fig. 1. The products of the hydrothermal reaction obtained at temperatures of 95 °C (A, B), 140 °C (C, D) 180 °C (E, F): A — accumulation of the zeolite crystals X; B — zeolites crystals X and P; C — a single crystal of P zeolite; D — crystals of P analcime and zeolite; E — a single crystal of analcime; F — accumulation of cancrinite crystals

Рис. 2. Лежалые хвосты железорудной фабрики. Общий вид исходной пробы: А — зона пляжа; В — зона пруда. Общий вид проб после отмучивания, класс крупности $-1+0.5$ мм: С — пляж; D — пруд

Fig. 2. Stale tailings of the Iron ores mining processing plant. Initial sample, general view: А — beach zone; В — pond area of the. Sample after laundering, general view, class size $-1+0.5$ mm: С — beach zone; D — pond

Рис. 3. Лежалые хвосты обогащения, исходная проба, размер обломков 1×1.5 см. А — зона пляжа, В — пруд, μ РТ, слева направо: томограмма; сегментация по TomAnalysis, гистограмма выделенных фаз, в %. Слоистые алюмосиликаты — голубое, кварц — желтое, полевые шпаты и карбонаты — зеленое, гидроксиды железа (гетит) — оранжевое, гематит — коричневое, магнетит-2 — синее, магнетит-1 — малиновое

Fig. 3. Stale tailings, Initial sample, fragments size 1×1.5 cm. А — beach zone; В — pond area, RT, left to right: μ XCT, segmentation by TomAnalysis, histogram of the selected phase, in %. Layered aluminosilicates — blue, quartz — yellow, feldspar and carbonates — green, iron hydroxides (goethite) — orange, hematite — brown, magnetite-2 — blue, magnetite-1 — crimson

ление рудных и породообразующих фаз в значительной степени будет влиять как на методы рудоподготовки, так и на технологию их обогащения.

Главными рудными минералами являются магнетит (10–13 %) и гетит (8–13 %), в подчиненном количестве присутствует гематит (7 %). Из породообразующих минералов встречаются кварц (30–32 %), полевой шпат (4 %), слоистые алюмосиликаты (35 %). В качестве акцессорных минералов постоянно отмечаются пирит, халькопирит, гранат, пироксен, эпидот, рутил, кальцит. Лежалые хвосты можно отнести к гематит-магнетит-гетитовому и гематит-гетит-магнетитовому минеральным типам.

Магнетит — главный рудный минерал, содержание которого в магнитных фракциях достигает 80 %. Большой частью зерна минерала сохраняют кристаллографическую огранку (октаэдры, реже ромбодекаэдры), но встречаются также фрагменты кристаллов и окатанные зерна. Электронно-микроскопическими исследованиями установлены срастания октаэдрических кристаллов магнетита, поверхность которых обычно отличается высокой микропористостью и ми-

кротрещиноватостью. Форма и размер пор и трещин различные. Структурное преобразование поверхности зерен магнетита связано с гипергенными процессами. Интенсивное воздействие природных факторов на лежалые хвосты в целом и магнетит в частности привело к образованию вторичных коллоидноподобных выделений, обнаруженных на кристаллах магнетита. Рентгеноспектральным микроанализом установлено, что они отличаются более высокими содержаниями марганца, титана, кремния, алюминия, фосфора. Грани одного зерна магнетита могут быть изменены в различной степени, что также фиксируется электронно-микроскопическими исследованиями.

Магнетит неравномерно гематитизирован (мартитизирован). Гематит развивается по магнетиту в виде пятен различных форм и размеров, каемок. Нередко магнетит полностью замещен гематитом, гетитом и гидрогетитом с сохранением формы зерен (рис. 4).

Неоднородность магнетита связана не только с мартитизацией, но и с широко развитыми в нем структурами распада. Структуры распада свойственны магнетиту, обогащенному титаном (рис. 5). Прослеживаются

Рис. 4. Строение зерен магнетита (отраженный свет, николи параллельны): А — различные стадии изменения зерен магнетита; В — неизмененный магнетит и магнетит, практически полностью замещенный гематитом; С — зерно магнетита, полностью замещенное гетитом и гидрогетитом; D — зерно магнетита с каймами и прожилками гематита

Fig. 4. The structure of magnetite grains (the reflected light, Nicols II): А — different phase changes of magnetite grains; В — unaltered magnetite and magnetite being almost completely replaced by hematite; В — magnetite grain being completely replaced by goethite and hydrogoethite; D — magnetite grain with edges and veins of hematite

Рис. 5. Структуры распада в магнетите, отраженный свет: А — николи параллельны, В — николи скрещены

Fig. 5. Decay structures in the magnetite, the reflected light: А — Nicols ||; В — crossed Nicols

сетчатые и решетчатые структуры распада. Вдоль направлений октаэдрической отдельности магнетита присутствует гематит.

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что в магнетите блочного микростроения структуры распада нередко ориентированы субпараллельно плоскостям микроблоков (рис. 6). Наблюдаются хорошо сохранившиеся несколько измененные субпараллельные микроблоки, характеризующиеся слабо повышенными концентрациями Mn, Ti, что подтверждено данными рентгеноспектрального микроанализа, и разделяющие их микрзоны, сформированные тонкодисперсным агрегатом, состоящим из слоистых алюмосиликатов, рутила и анатаза. Неоднородное строение магнетита в целом негативно влияет на его магнитные и плотностные характеристики.

Гематит преимущественно является продуктом изменения магнетита, минерал встречается в тесном срастании с последним. Отмечаются частичные и полные псевдоморфозы гематита по магнетиту, при этом, как

Рис. 6. Структуры распада, ориентированные субпараллельно плоскостям микроблоков магнетита, РЭМ

Fig. 6. Decay structures in the magnetite, oriented subparallel to the planes of magnetite microblocks, SEM

правило, сохраняется октаэдрическая и кубическая форма зерен. Сложный характер срастания гематита и магнетита позволяет рассматривать их в качестве единого полиминерального рудного агрегата, который невозможно селективно разделить на конкретные минеральные фазы. Однозначно можно говорить о негативном влиянии гематитизации на процессы селективного выделения магнетита. Содержание свободных зерен гематита весьма незначительно, поэтому вопрос выделения гематита в самостоятельный продукт не представляет практической значимости и не рассматривается.

Гетит и гидрогетит при рудоподготовке и дальнейших обогащательных операциях будут переизмельчаться и концентрироваться в хвостах, что обусловлено их морфоструктурными характеристиками и тесной ассоциацией с одной стороны с главными рудными минералами, а с другой стороны — со слоистыми алюмосиликатами.

Кварц является главным породообразующим минералом, его содержание в немагнитных фракциях достигает 80 %. Более 50 % кварца концентрируется в легких фракциях хвостов. Минерал встречается в виде окатанных обломков псаммитовой и алевритовой размерности, кристаллов удлиненного облика, зерен неправильной формы, а также образует сростки, в том числе и с рудными минералами.

Минералогические особенности лежалых хвостов позволяют сделать выводы о характерных признаках минералов, определяющих технологические свойства сырья. Гематитизация, микроблочность, микротрещиноватость и микропористость магнетита, наличие структур распада, а также присутствие изоморфных примесей в минерале приводит к снижению его плотностных и магнитных свойств. Микроблочное строение магнети-

та может способствовать повышению коэрцитивной силы и флуокулляции мелких зерен минерала. Основываясь на результатах изучения гранулярного состава хвостов, характера раскрытия сростков рудных минералов и их распределении по классам крупности, а также поведении лежалых хвостов в процессах дезинтеграции с последующей магнитной сепарацией, в качестве основных методов обогащения можно рекомендовать гравитационный и магнитный.

Никельсодержащие шлаки сформированы неоднородным материалом (рис. 7), гранулярный состав которого варьируется в значительном интервале, но в целом преобладают агрегаты крупностью более 0.5 мм (58 %). Шламообразующие элементы представлены Fe (22.60 %), Si (18.85 %), Ca (7.89 %), Mg (5.7 %). Потенциально ценными металлами являются Ni (0.14 %), Co (0.05 %), Cr (0.94 %).

Шлаки почти на 95 % состоят из аморфной фазы, сформированной оливиновым стеклом. Кристаллические фазы представлены хромитом (3 %), фаялитом (1.0 %), пирротинном (0.5 %), пентландитом (менее 0.5 %), вюститом (0.3 %) и фазой металла со структурой железа. Фазы, формирующие шлак, могут быть как природными, так и техногенными, поэтому их состав и свойства отличаются от природных аналогов.

Шлакообразующая матрица (стекло) неравномерно насыщена точечными, сыпьевидными выделениями (рис. 8), сформированными округлыми, изометрическими и продолговатыми рудными зернами (рис. 9, 10), в т. ч. металлов, размером менее 30 мкм.

Рис. 7. Никельсодержащий шлак, общий вид

Fig. 7. Nickel-bearing slag, general view

Рис. 8. Никельсодержащие шлаки, формы выделения и детали строения рудных фаз; искусственные полированные шлифы, отраженный свет, николи параллельны, *ув. см рис.* А — неоднородность шлака, вкрапления округлых выделений пентландита (светлое) и угловатых включений хромита (серое); В — включение хромита, по границам которого расположена вкрапленность пентландита, С — тонкая вкрапленность пентландита в хромите; D — фрагмент дендритов роста металлической фазы — Fe:Ni:Co в соотношении 11:6:1

Fig. 8. Nickel-bearing slags, ore phases forms of presence and structure details; artificial polished sections, the reflected light, Nicols II, magnification see Figure. A — heterogeneity of slag, rounded inclusions of pentlandite (light) and angular inclusions of chromite (gray); B — inclusion of chromite, there is a pentlandite impregnation along chromite boundaries, C — a thin impregnation of pentlandite inside chromite; D — a fragment of dendrites of the metal phase—Fe:Ni:Co, the ratio content of 11:6:1

Хромит — главный рудный минерал, присутствует в виде индивидуализированных неоднородных зерен гипидиоморфной формы, по границам которых присутствует пентландит (табл. 1). Последний имеет размер менее 0.1 мм.

Пентландит присутствует в виде округлых и овальных выделений переменного состава, содержание никеля в нем варьируется от 30.0 до 58.94 %, присутствует изоморфная примесь кобальта от (0.65—1.34 %) (табл. 2). Пентландит образует с пирротинном двухфазные эвтектические колонии.

Пирротин присутствует в виде единичных зерен изометрической и округлой формы (табл. 3, рис. 8, 9), диагностирован РФА. Формирует двухфазные эвтектические колонии с пентландитом.

Вюстит — идентифицирован только методом рентгенографического фазового анализа (XPD).

Металлическая фаза — кристаллическая структура структурного типа α -Fe имеет трехфазный состав (железо+никель+кобальт). Присутствует в виде дендритов и зон нанометровой размерности в пентландите. Размеры выделений менее 1 мкм — первые нанометры (рис. 9, d).

Минералогические особенности шлаков (нанометровые размеры рудных фаз, их неоднородное строение и поликомпонентный состав, варьирующие содержания металлов, связанные с широкими изоморфными замещениями элементов в кристаллической структуре минералов; отсутствие электропроводности и магнитных свойств) неблагоприятны для переработки никельсодержащих шлаков методами механического обогащения. В то же время, индивидуализированная форма выделений рудных и металлических фаз, высокие содержания никеля, сопоставимые с промышленными при относительно высоком количестве изоморфного кобальта, практически полное отсутствия вредных и токсичных примесей (как изоморфных, так и механических) позволяют предположить возможность их вторичного передела химико-металлургическими методами.

Глубина минералогического изучения техногенного сырья, в том числе горнопромышленных отходов, всегда определяется конкретными задачами. Тем не менее, следует подчеркнуть, что сегодня к минералого-технологической оценке горнопромышленных отходов предъявляются серьезные требования: направленность на ресурсосбережение и повышение глубины переработки,

Таблица 1. Химический состав хромита по данным МРСА

Table 1. Chemical composition of chromite, microprobe

№	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	O	Сумма
1	5.10	5.61	0.00	0.10	0.00	38.37	0.73	16.78	0.00	0.00	0.00	0.28	31.26	98.33
2	4.44	4.59	0.16	0.20	0.11	36.94	0.46	20.09	0.18	0.19	0.00	0.00	30.50	97.86
3	4.57	4.36	0.47	0.27	0.11	37.76	0.28	18.66	0.25	0.43	0.26	0.33	30.86	98.62
4	3.63	5.96	0.00	0.12	0.17	31.51	0.27	26.87	0.01	0.00	0.00	0.00	30.17	98.70

Рис. 9. Никельсодержащие шлаки, изображение в обратно рассеянных электронах. А — каплевидные неоднородные выделения сульфидов, В — эвтектические колонии пентландита и пирротина (*Ol* — оливин, *Chr* — хромит, *Pn* — пентландит, *Po* — пирротин)

Fig. 9. Nickel-bearing slags, image in back scattered electrons. A — a drop-like inhomogeneous sulfide isolations/segregations, B — pentlandite and pyrrhotite eutectic colonies (*Ol* — olivine, *Chr* — chromite, *Pn* — pentlandite, *Po* — pyrrhotite)

системный и комплексный подход, применение инновационных технических и технологических решений, достоверность, исключение субъективных факторов, экологичность используемых методов, обоснованность выводов и рекомендаций [3].

Заключение

Для горнопромышленных отходов, являющихся сегодня основными типами техногенного сырья, при- сущи минералогические характеристики (минераль-

Таблица 2. Химический состав пентландита по данным МРСА

Table 2. Chemical composition of pentlandite, microprobe

№	S	Fe	Co	Ni	Cu	Сумма
1	29.36	32.63	0.53	37.16	0.22	99.90
2	25.23	32.14	0.28	41.90	0.32	99.87
3	20.24	38.21	0.57	40.57	0.39	99.93
4	18.40	28.30	1.27	51.96	0.00	99.92
5	21.00	28.83	1.34	48.68	0.00	99.85
6	10.99	29.47	0.28	58.63	0.00	99.37
7	12.60	28.23	0.00	58.94	0.00	99.76
8	32.30	32.41	0.00	35.27	0.00	99.98

Таблица 3. Химический состав пирротина по данным МРСА

Table 3. Chemical composition of pyrrhotite, microprobe

№	S	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Сумма
1	27.95	69.81	0.86	0.07	0.22	0.32	99.00
2	28.85	69.14	0.74	0.69	0.32	0.08	99.70
3	28.56	69.38	0.83	0.57	0.94	0.00	99.71
4	53.97	45.73	0.20	0.00	0.00	0.00	99.90
5	53.76	46.01	0.10	0.00	0.00	0.00	99.87

ный и(или) фазовый состав, форма нахождения полезного компонента, морфоструктурные особенности и характер распределения, реальные состав и строение), определяющие в дальнейшем стратегию и тактику его вторичного использования:

1) как исходное сырье без переработки, например, для извлечения ценных металлов;

Рис. 10. Никельсодержащие шлаки, детали строения, изображение в обратно рассеянных электронах. А — пятнистая, коллоидная матрица шлака: двухфазные фаялит-оливиновые эвтектики с сыпьевидной вкрапленностью пирротина и пентландита, В — ячеистая структура рудных зерен с включениями хромита тетрагональной формы, С — хромит, ооконтуренный пирротин и пентландитом округлой формы, D — дендриты пентландита с участками выплавления металла Fe+Ni+Co (*Ol* — оливин, *Fa* — фаялит, *Chr* — хромит, *Pn* — пентландит, *Po* — пирротин, *Me* — металл)

Fig. 10. Nickel-bearing slags, structure details, image in back-scattered electrons. A — spotted to colloform matrix of the slag: two phase fayalite-olivine eutectic with disseminated pyrrhotite and pentlandite rush impregnation, B — cell-type structure of the ore grains with tetragonal-shape chromite inclusions, C — chromite, countered by pyrrhotite and pentlandite rounded-shape grains, D — pentlandite dendrites with melted metal Fe+Ni+Co areas (*Ol* — olivine, *Fa* — fayalite, *Chr* — chromite, *Pn* — pentlandite, *Po* — pyrrhotite, *Me* — metal)

2) как исходное сырье после дополнительной переработки для получения материальных ресурсов в индустрии;

3) как объект утилизации.

Это показано на конкретных объектах (лежалые железосодержащие хвосты и никельсодержащие шлаки), на долю подобных приходится основной объем промышленных техногенных отходов.

Работа выполнена по теме НИР «Научные основы эффективного недропользования, развития и освоения минерально-сырьевой базы, разработка и внедрение инновационных технологий, геолого-экономическое районирование Тимано-Североуральского региона» (ГР № АААА- А17-117121270037-4) при частичной финансовой поддержке Программ УрО РАН (проект 18-5-5-44).

Литература

1. Жукова В. Е., Целюк Д. И., Ожогина Е. Г., Целюк И. Н. Минералогические особенности магнетита лежалых хвостов горнорудного производства Красноярского края // Разведка и охрана недр. 2012. № 6. С. 58–60.
2. Котова О. Б., Москальчук Л. Н., Шушков Д. А., Леонтьева Т. Г., Баклай А. А. Сорбенты радионуклидов на основе промышленных отходов: физико-химические свойства и перспективы использования // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 4. С. 29–36. (doi: 10.19110/2221-1381-2017-4-29-36).
3. Ожогина Е. Г., Шадрунова И. В., Чекушина Т. В. Роль минералогических исследований в решении экологических проблем горнопромышленных районов // Горный журнал. 2017. 11. С. 105–111.
4. Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Козлов А. П. Минералогические особенности металлургических никельсодержащих шлаков и перспективы их вторичного использования // Обогащение руд. 2017. № 3 (369). С. 49–56. (doi: 10.17580/or.2017.03.08).
5. Панов П. Отходам подготовили стратегию // Известия. 2018. 29 января. (URL: <https://iz.ru/701796/pavel-panov/otkhodam-podgotovili-strategiiu>).
6. Чантурия В. А., Ожогина Е. Г., Шадрунова И. В. Задачи экологической минералогии при освоении недр Земли // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых (СО РАН) 2016. № 5. С. 193–196.
7. Целюк Д. И., Жукова В. Е., Ожогина Е. Г., Якушина О. А., Целюк И. Н. Минералого-технологические особенности хвостов мокрой магнитной сепарации железных руд и перспективы извлечения из них железа // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 4. С. 412–424.
8. Якушина О. А., Ожогина Е. Г., Хозяинов М. С. Микротомография техногенного минерального сырья // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2015. № 11. С. 39–44.
9. Kotova O. B., Shabalin I. L., Kotova E. L. Phase Transformations in Zeolite Synthesis Technologies from Coal Fly Ash. Sorption Properties // J. Mining Institute, 2016. V. 220, P. 526–531. (doi: 10.18454/PMI.2016.4.526).
10. Kotova O., Silaev V., Lutoev V., Vakhrushev A. Mineralogy and crystal chemistry of iron in the Timan bauxites and products of their technological processing // Materials Science and Engineering, 123 (2016) 012024 (doi:10.1088/1757-899X/123/1/012024).

References

1. Zhukova V. E., Tseluk D. I., Ozhogina E. G., Tseluk I. N. *Mineralogicheskie osobennosti magnetita lezhalikh khvostov gornorudnogo proizvodstva Krasnoyarskogo kraia* (Mineralogical features of stale tailings of magnetite ore-mining industry of the Krasnoyarsk territory). Prospecting and protection of bowels, 2012, No. 6, pp. 58–60.
2. Kotova O. B., Moskalchuk L. N., Shushkov, D. A., Leontieva T. G., Baklay A. A. *Sorbenty radionuklidov na osnove promyshlennykh othodov: fiziko-himicheskie svoystva i perspektivy ispol'zovaniya* (Radionuclide sorbents based on industrial wastes: physical and chemical properties and application potential). Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS, 2017, No. 4, pp. 29–36. (doi: 10.19110/2221-1381-2017-4-29-36).
3. Ozhogina E. G., Shadrinova I. V., Chekushina T. V. *Rol mineralogicheskikh issledovaniy v reshenii ekologicheskikh problem gornopromyshlennikh rajonov* (The role of mineralogical studies in solving environmental problems of mining areas). Gornyy Zhurnal, 2017, No. 11, pp. 105–111.
4. Ozhogina E. G., Yakushina O. A., Kozlov A. P. *Mineralogicheskiye osobennosti metallurgicheskikh nikelsoderzhashchikh sh-lakov i perspektivy ikh vtorichnogo ispol'zovaniya* (Mineralogical features of the metallurgical slag of Nickel and the prospects of their secondary use). Obogashchenie Rud, 2017, № 3 (369), pp. 49–56. (doi: 10.17580/or.2017.03.08).
5. Panov P. *Otkhodam podgotovili strategiju* (The Strategy has been prepared for Waste) // Izvestia. 2018. January 29th. (URL: <https://iz.ru/701796/pavel-panov/otkhodam-podgotovili-strategiiu>).
6. Chanturia V. A., Ozhogina E. G., Shadrinova I. V. *Zadachi ekologicheskoy mineralogii pri osvoenii nedr Zemli* (Ecological Mineralogy tasks at the development of the Earth's interior). Physical and technical problems of mineral development (SB RAS), 2016, No. 5, pp. 193–196.
7. Tseluk, D. I., Zhukova V. E., Ozhogina E. G., Yakushina O. A., Tseluk I. N. *Mineralogo-ekhnologicheskkiye osobennosti khvostov mokroi magnitnoi separatsii zheleznykh rud i perspektivy izvlecheniya iz nikh zheleza* (Mineralogical-technological features of wet magnetic separation tails of the iron ores and the prospects of iron extraction from them). J. of Siberian Federal University. Series: Equipment and technologies, 2013, V. 6, No. 4, pp. 412–424.
8. Yakushina O. A., Ozhogina E. G., Khozyainov M. S. *Microtomografiya technogennogo mineralnogo siriya* (Microtomography of technogeneous mineral matter). Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS, 2015, No. 11, pp. 39–44.
9. Kotova O. B., Shabalin I. L., Kotova E. L. Phase Transformations in Zeolite Synthesis Technologies from Coal Fly Ash. Sorption Properties. J. Mining Institute, 2016, V. 220, pp. 526–531. (doi: 10.18454/PMI.2016.4.526).
10. Kotova O., Silaev V., Lutoev V., Vakhrushev A. Mineralogy and crystal chemistry of iron in the Timan bauxites and products of their technological processing. Materials Science and Engineering 123 (2016) 012024 (doi:10.1088/1757-899X/123/1/012024).