

ESG-трансформации в сфере переработки техногенного минерального сырья

И.В. Шадрунова¹✉, Е.В. Зелинская², Н.Н. Орехова¹, О.Е. Горлова¹, Т.В. Чекушина¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация
✉shadrunova_@mail.ru

Резюме: На основе адаптационного, междисциплинарного и аналитико-синтетического подходов проведены анализ и систематизация материалов по теории и практике комплексного использования минерального сырья и переработке техногенных ресурсов, прослежено изменение функциональных элементов имеющихся технологий, выявлены резервы существующих технологий и спрогнозированы потенциалы вновь создаваемых. Показана технологическая трансформация в сфере переработки горнопромышленных отходов, обоснованы предпосылки выхода минерально-сырьевого сектора на новый уровень сложности использования техногенных минеральных ресурсов. Разработана модель социальных оснований научной инноватики в области переработки отходов. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены технологические параметры селективного извлечения меди и цинка при максимальной степени концентрации методом гальванокоагуляции с учётом закономерностей фазообразования в условиях аэрации. Обоснована флотационная технология переработки техногенных гидроминеральных ресурсов, которая является одной из наиболее перспективных и отвечающих требованиям ESG-трансформации, основные факторы которой приведены в данной статье.

Ключевые слова: техногенные отходы, минеральное сырьё, трансформация, ESG-трансформация, гидроминеральные ресурсы, переработка отходов, устойчивое развитие

Для цитирования: Шадрунова И.В., Зелинская Е.В., Орехова Н.Н., Горлова О.Е., Чекушина Т.В. ESG-трансформации в сфере переработки техногенного минерального сырья. *Горная промышленность*. 2023;(1):71–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-71-78>

ESG-transformation in processing of man-made mineral raw materials

I.V. Shadrunova¹✉, E.V. Zelinskaya², N.N. Orekhova¹, O.E. Gorlova¹, T.V. Chekushina¹

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation
✉shadrunova_@mail.ru

Abstract: Based on the adaptive, interdisciplinary and analytical-synthetic approach, the analysis and systematization of materials on the theory and practice of integrated use of mineral raw materials and processing of man-made resources was carried out, the change in the functional elements of existing technologies was traced, the reserves of existing technologies were identified and the potentials of newly created ones were predicted. The technological transformation in the field of processing of technogenic waste is shown, the prerequisites for the mineral resource sector to reach a new level of complexity of the use of technogenic mineral resources are substantiated. A model of the social foundations of scientific innovation in the field of waste recycling has been developed. The technological parameters of selective extraction of copper and zinc at the maximum degree of concentration by galvanocoagulation are theoretically substantiated and experimentally confirmed, taking into account the regularities of phase formation under aeration conditions. The flotation technology of processing technogenic hydromineral resources is substantiated, which is one of the most promising and meets the requirements of ESG-transformation, the main factors of which are given in this article.

Keywords: technogenic waste, mineral raw materials, transformation, ESG-transformation, hydromineral resources, waste processing, sustainable development

For citation: Shadrunova I.V., Zelinskaya E.V., Orekhova N.N., Gorlova O.E., Chekushina T.V. ESG-transformation in processing of man-made mineral raw materials. *Russian Mining Industry*. 2023;(1):71–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-1-71-78>

Введение

Стратегии устойчивого развития компаний все больше превращаются из планов, решающих отдельные социальные и экологические задачи, зачастую в ущерб экономическим показателям, в реальные инструменты, позволяющие достичь более высокого уровня производства и его прибыльности именно за счет решения социальных и экологических проблем. Это – новая парадигма, совершенно качественно новый подход к пониманию вклада экологии и социума в развитие экономики, их триединства, что собственно и лежит в основе концептуального понимания устойчивого развития и объективно необходимой ESG-трансформации для достижения его целей.

В условиях переходного периода инструментом повышения устойчивости горных предприятий может стать их цифровая и ESG-трансформация [1]. Базовыми принципами ESG-трансформации являются ответственное инвестирование и ведение компаниями социально-ориентированного бизнеса, отличающегося качественным корпоративным управлением и заботой об окружающей среде. Аббревиатура ESG указывает, что трансформация должна проходить по трём основным направлениям: окружающая среда, социальная сфера, корпоративное управление.

Переходный период смены пятого технологического уклада шестым характеризуется стремлением к альтернативным источникам энергии, повышением роли процессов декарбонизации, ростом возможностей моделирования сложных систем, обеспечиваемых информационными технологиями [2; 3].

Грядущие системные технологические переходы подразумевают радикальное изменение ядра базовых технологий [4; 5], на основе которых производство будет развиваться в ближайшей и долгосрочной перспективе. Основными процессами технологических трансформаций XXI в. могут быть названы переходы: от технологий микро- к технологиям нано-; от программируемых систем к когнитивным информационным технологиям и искусственному интеллекту [2]; от энергозатратных технологий к энергосберегающим [6]; от интенсивных технологий эксплуатации природных ресурсов к ресурсосберегающим и экологически ориентированным [7].

Необходимость и даже неизбежность таких изменений вызваны невосполнимостью определенной части природных ресурсов, проблемами экологической безопасности, связанными с изменением климата, с влиянием отходов переработки природных ресурсов на окружающую среду, с проблемами истощения мировых запасов природных энергетических и минеральных ресурсов [6; 8].

В процесс принятия компаниями технологических, организационных и управленческих решений включаются факторы, указанные в табл. 1.

Уже сегодня ESG-трансформация становится важнейшим условием доступа компаний к «зелёному» финансированию. Россия постепенно встраивается в этот общемировой процесс и формирует свою систему правил в сфере устойчивых финансов и ESG-трансформации. В связи с этим были сформированы национальные цели и основные направления устойчивого («зеленого») развития¹ и утверждены критерии оценки зеленых и адаптационных проектов в этой сфере².

Таблица 1
Факторы ESG-трансформации

Table 1
ESG-transformation factors

Е-факторы	С-факторы	Г-факторы
Изменение климата из-за деятельности компании, выбросы парниковых газов, производство отходов, истощение природных ресурсов, включая питьевую воду, сокращение площади лесов	Условия труда, в том числе использование детей в качестве рабочих, гендерный состав компании, охрана здоровья на предприятии, взаимоотношения с потребителями и местными сообществами, связи с поставщиками	Долгосрочная стратегия компании, аудит и внутренний контроль, экспертизы и сертификации, состав совета директоров, вознаграждение менеджмента, права акционеров

Национальная таксономия «зеленых» проектов³ включает следующие направления:

- утилизация отходов с получением материальной продукции, в том числе вторичного сырья;
- утилизация отходов с получением энергии;
- создание и модернизация комплексных объектов по утилизации и обработке отходов;
- ликвидация объектов накопленного вреда окружающей среде;
- создание и модернизация инфраструктуры для производства биоразлагаемых материалов и внедрение их в оборот и пр.⁴

Критериями отнесения проектов к адаптационным в таких областях промышленности, как добыча и обогащение руд черных, цветных, благородных, редких и редкоземельных металлов, получение металлов, становятся повышение ресурсной и энергетической эффективности в соответствии с наилучшими доступными технологиями, утилизация отходов собственной производственной деятельности (металлургических шлаков, пылей и шламов газоочисток), утилизация энергетических ценных технологических газов (коксовых, доменных, конвертерных и ферросплавных); использование технологий извлечения редкоземельных металлов из золошлакоотвалов; применение технологий улавливания и хранения парниковых газов (CO₂) (CCS Carbon Capture & Storage) и т.п.⁵ Все эти мероприятия призваны в первую очередь сохранить или улучшить состояние окружающей среды, снизить выбросы и сбросы загрязняющих веществ и предотвратить их влияние на окружающую среду, сократить выбросы парниковых газов, обеспечить энергосбережение и повышение эффективности использования ресурсов.

Отходы производства и, в частности горнопромышленного, на которые приходится 92–95% от всего объема ежегодно образующихся в стране отходов, уже давно признаются вторичными минеральными ресурсами⁶ и рассматриваются как техногенное минеральное сырье в связи с огромными объемами их образования и накопления, ком-

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 №1912-р.

⁴ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 №1912-р.

⁵ Постановление Правительства России от 21 сентября 2021 г. №1587.

⁶ Постановление Правительства России от 21 сентября 2021 г. №1587.

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14.07.2021 №1912-р.

² Постановление Правительства России от 21 сентября 2021 г. №1587.

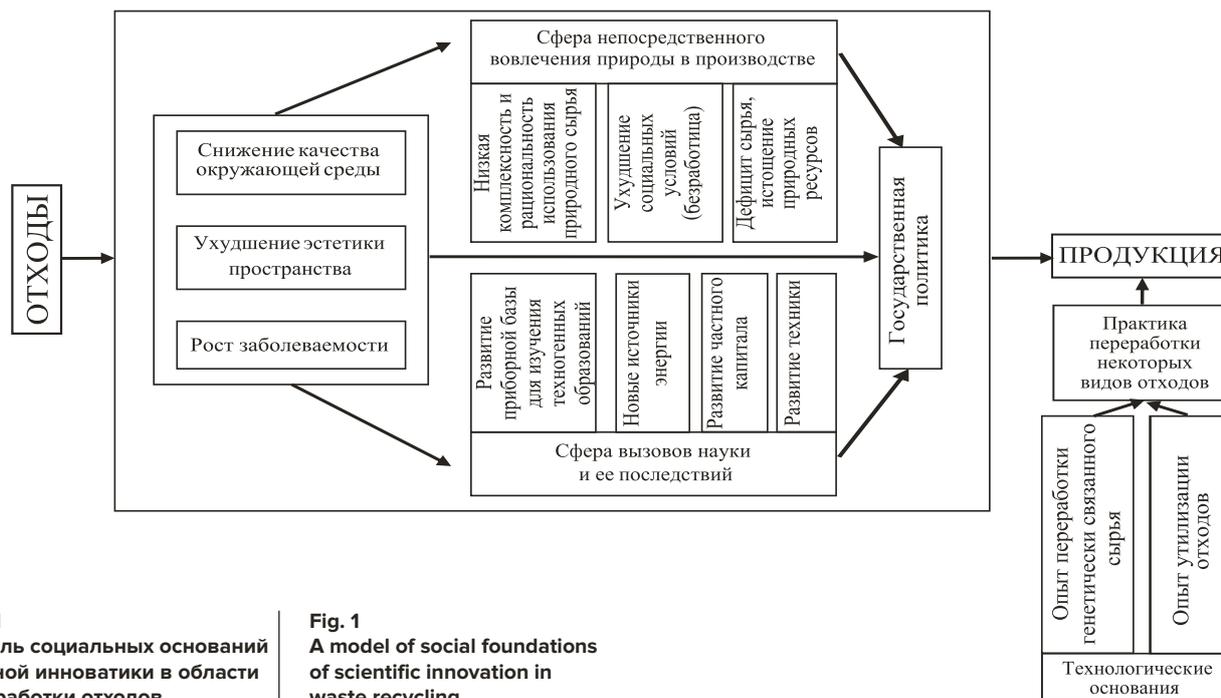


Рис. 1
Модель социальных оснований научной инноватики в области переработки отходов

Fig. 1
A model of social foundations of scientific innovation in waste recycling

пактностью залегания, повышенными концентрациями в них некоторых ценных рудных и нерудных компонентов и востребованностью для производства из них дополнительных объемов минеральной продукции [9; 10].

В обществе имеются как социальные, так и технологические основания переработки отходов и превращения их в продукцию (рис. 1).

Факторы переработки отходов лежат в сфере непосредственного вовлечения природы в производство и негативных последствий накопления отходов. Стимулирующие факторы переработки отходов продиктованы вызовами науки. Анализ основных направлений развития технологических процессов разделения и практики переработки минерального сырья техногенного происхождения показал, что уже есть достаточные технологические основания реализуемости переработки горнопромышленных отходов и получения продукции.

На наш взгляд, необходимым условием перевода этого пока еще по большей части потенциального минерального сырья в активно эксплуатируемое должна стать технологическая трансформация производств. Это требует разработки и расширения спектра реализуемых технологий переработки техногенного минерального сырья, призванных обеспечить возросшие запросы населения на ликвидацию отходов как источников загрязнения окружающей среды и запросы производства – как дополнительных минерально-сырьевых источников.

С позиций указанных текущих и предстоящих изменений в производственно-экономической деятельности отечественных горнодобывающих, металлургических компаний и крупных вертикально интегрированных холдингов минерально-сырьевого профиля представляет интерес рассмотрение происходящих технологических трансформаций в сфере переработки техногенного минерального сырья.

Целью настоящих исследований являлся анализ технологий переработки, главным образом, техногенных гидроминеральных ресурсов с позиций ESG-трансформации предприятий горно-металлургического профиля.

Методика исследований

Основные методологические подходы исследования:

- адапционный, основанный на комплексном анализе системы имеющихся свойств горнопромышленных отходов; на выявлении главной связи или отношения свойств отхода; на параметрической и структурной адаптации известных технологических решений к выявленным особенностям свойств отхода; на применении комбинации физических, физико-химических, химических процессов разделения, выбранных в соответствии с наиболее контрастными технологическими свойствами отходов;
- междисциплинарный, базирующийся на рассмотрении отходов как самостоятельных компонентов природной среды и на новом принципе научного подхода к разработке технологии их переработки: химическая целостность минерального отхода включает в себе совокупность природных свойств генетически связанного минерального сырья и приобретенных свойств отхода, которые выступают критериями выбора разделительных процессов;
- аналитико-синтетический в общей логике использования методов анализа, аналогии, моделирования, натурных испытаний, синтеза и формализации; ведущим методом выбран метод декомпозиции как единство анализа и синтеза, в рамках которого проведены анализ и систематизация материалов по теории и практике комплексного использования минерального сырья и переработки техногенных ресурсов; прослежено изменение функциональных элементов имеющихся технологий; выявлены резервы существующих технологий и спрогнозированы потенциалы вновь создаваемых.

Результаты и обсуждение

Российские справочники наилучших доступных технологий в области переработки минерального сырья: ИТС 49-2017 «Добыча драгоценных металлов»; ИТС 25-2017 «Добыча и обогащение железных руд»; ИТС 37-2017 «До-

быча и обогащение угля»; ИТС 16-2016 «Горнодобывающая промышленность: общие процессы и методы»; ИТС 3-2019 «Производство меди»; ИТС 23-2017 «Добыча и обогащение руд цветных металлов» – пока не содержат технологий комплексной переработки гидроминерального сырья, в качестве которого наиболее часто рассматриваются рудничные и подотвальные воды. Предприятия горной отрасли для целей извлечения ценных компонентов из металлизированных природно-техногенных вод применяют в лучшем случае цементацию меди на железном скрапе, а в большинстве случаев гидролитическое осаждение с получением комплексных металлосодержащих «гипсовых» осадков.

Анализ и систематизация технологий переработки гидроминерального техногенного сырья показывают перспективность применения развернутых схем переработки, совмещающих селективное извлечение ценных компонентов из вод с последующей комплексной доочисткой. Технологическая трансформация схем очистки вод в схемы переработки с получением дополнительной продукции возможна за счет применения электрохимических методов очистки вод [11], использования новых классов реагентов, в том числе полученных из отходов производства и потребления, например, из ПЭТ-тары [12]; применения ионообменных смол [13]; использования новых, обладающих нейтрализующей и сорбционной способностью, материалов на основе природного сырья – каолина [14], брусита [15; 16], цеолитов [17]. Применение сорбентов на основе природного минерального сырья приближает технологии к биосферным процессам.

Разработка технологий переработки техногенного гидроминерального сырья с позиций ESG-трансформации предприятий горно-металлургического профиля должна проводиться на основе исследований технологических свойств реальных аквальных систем.

Экспериментальное изучение реальных вод сопряжено с рядом ограничений: быстрым изменением свойств воды без консервации пробы, необходимостью переработки очень больших объемов проб при наработке продуктов для дальнейших их технологических исследований, коррозией лабораторного оборудования из-за высокой агрессивности изучаемых вод. Заменить часть длительных и затратных поисковых экспериментальных лабораторных исследований позволяет моделирование в современных отечественных программных комплексах имитации и моделирования физико-химических процессов в природных и технологических системах, таких как «Селектор», «НCh», применение программ квантово-химических расчетов, создание математических моделей процессов осаждения, сорбции, флотации, выщелачивания.

С использованием физико-химического моделирования взаимосвязей в системе $\text{CuSO}_4, \text{Cu}(\text{OH})_2, \text{ZnSO}_4, \text{Zn}(\text{OH})_2, \text{Fe}-\text{C}-\text{O}_2, \text{H}_2\text{SO}_4, \text{H}_2\text{O}$ в области параметров, характерных для рудничных и подотвальных вод горных предприятий, добывающих колчеданные медные и медно-цинковые руды, разработана гальванокоагуляционная технология извлечения меди и цинка из подотвальных вод.

Разработана технология ионной флотации для извлечения ценных компонентов (Cu, Zn, Fe, Ni, Pb, Cd) из техногенных растворов. При решении задач выбора реагентов и обоснования их эффективности использованы квантово-химические расчеты. Для целей оптимизации и управления технологией разработана математическая модель переработки техногенных металлизированных вод горных предприятий, содержащих тяжёлые и цветные металлы,

с использованием метода напорной флотации. В основе модели лежит краевая задача, порожденная системой дифференциальных уравнений первого порядка. Использование математического моделирования позволяет проводить процесс извлечения тяжелых и цветных металлов и очистку сточных вод горных предприятий в оптимальном режиме на основе информации о концентрации субстратов металлов в каждом из описываемых состояний в любой момент времени [18].

С применением комплекса физико-химических и квантово-химических методов установлены механизмы и условия гидрохимического извлечения ценных металлов из продуктивных растворов выщелачивания лежалых хвостов флотации медно-цинковых колчеданных руд. Проведена оптимизация параметров разделения техногенных минеральных фаз. Для выделения благородных металлов из раствора выщелачивания второй стадии переработки лежалых хвостов флотации обосновано применение комплексобразующего реагента дифенилгуанидина, селективного в отношении золота, серебра и индифферентного к другим металлам, и определены оптимальные параметры процесса. Установлено, что применение реагента дифенилгуанидина обеспечивает селективное осаждение из раствора выщелачивания до 80,1% золота и 10,4% серебра в золотосеребросодержащий продукт. Обоснованы условия кислотно-основного осаждения железа, меди, цинка из растворов выщелачивания спеков хлораммонийной обработки лежалых хвостов флотации, при которых обеспечивается извлечение до 97,3% железа в железосодержащий металлопродукт для черной металлургии; до 96,4% цинка и 34,3% меди в Cu, Zn-продукт для цветной металлургии [19].

Применение разработанной технологической схемы ионной флотации микрокомпонентов из хлоридно-кальциевых рассолов позволит извлекать в индивидуальные продукты стронций до 96%, рубидий до 86%.

Моделирование позволило установить оптимальные области селективного извлечения меди и цинка в продукты с наибольшей массовой их долей при одновременном связывании железа, теоретически обосновать технологические параметры селективного извлечения с учётом закономерностей фазообразования в условиях аэрации. Избирательное выделение меди в виде феррита термодинамически наиболее вероятно при $\text{pH} = 2,6-4,1$, $E_h = 0,2-0,5$ В и мольном соотношении $\text{Fe}/\text{O}_2 = 1,0$. Выделение pH равновесных растворов, $5,2-6,2$ и $[\text{SO}_4^{2-}]$ менее $0,045$ моль/дм³.

Селективное выделение цинка в форме ферритных цинксодержащих соединений наиболее вероятно при pH равновесных растворов выше $6,2$, $E_h = 0,57-0,60$ В и $[\text{SO}_4^{2-}]$ менее $0,020$ моль/дм³ после предварительного извлечения меди из воды. Теоретические массовые доли меди и цинка в селективных осадках в оптимальных областях параметров составили соответственно $10,67-13,49$ и $6,28-11,78\%$ в пересчете из фазового состава осадков, что подтверждено экспериментально. Технология является экологически безопасной и легко встраиваемой в существующие схемы очистки вод на горных предприятиях.

Для уникального нетрадиционного вида гидроминеральных ресурсов – сверхкрепких природных рассолов, образующих жидкие отходы при разработке месторождений твердых полезных ископаемых, нефти и газа на обводненных продуктивных площадях, в частности Сибирской геологической платформы, трансформация технологического подхода к их освоению – единственный путь для получе-

ния эффективного результата по вовлечению их в промышленное использование. Основной проблемой селективного извлечения щелочных и щелочноземельных металлов (в частности, стронция и кальция) из исследуемых рассолов с целью получения минеральных солей является их богатый элементный состав и присутствие сходных по физико-химическим свойствам макро- и микрокомпонентов [20].

Такие особенности природных рассолов являются главными ограничениями для вовлечения их в промышленную переработку, так как необходимость разделения микро- и макрокомпонентов значительно усложняет технологические схемы, что ведет к их удорожанию и снижению рентабельности производства, вплоть до отрицательного значения.

Трансформируя закономерности поведения близких по свойствам компонентов в разбавленных и низкоконцентрированных растворах на воды рассольной минерализации, мы разработали технологическую классификацию рассолов, позволившую на основе изучения структурно-химических свойств рассолов предопределить использование различных технологических процессов для селективного извлечения из них ценных компонентов [21].

При помощи термодинамических расчетов устанавливаются количественные соотношения между вероятными для вод данного химического состава формами элементов, их активностью и устойчивостью ассоциатов.

Моделирование состава рассолов и установление формы нахождения ионов в них выполнено на основе строгих термодинамических расчетов вероятности их нахождения в виде того или иного соединения в сложных физико-химических системах, какую представляют собой подобные водно-солевые системы. Оценку истинного состава многокомпонентных рассолов проводили на основе соблюдения принципа локальных равновесий.

На основании определения термодинамических характеристик ионов раствора и собирателя при их нахождении в рассолах разработан гидратный механизм взаимодействия коллигенд – ПАВ при ионной флотации, обеспечивающий высокое извлечение стронция при расходах собирателя в несколько раз меньше стехиометрических.

На основании проведенных флотационных исследований было выявлено, что при различных исходных минерализациях рассола, а также различных расходах реагента имеют место различные механизмы флотации. Это обусловлено состоянием рассола и процессами гидратации-дегидратации, происходящими в них в зависимости от общей минерализации.

На основании расчетов форм нахождения компонентов было установлено, что в природных рассолах стронций представлен ионной формой, способной при использовании флотационной технологии образовывать соединения с анионом собирателя на 92,7% (Оленекский бассейн) и 82,3% (Ковыктиская площадь), а кальций – соответственно на 36,3 и 0,36%. Около 20% кальция представлено также в виде ионной формы CaCl^+ . Таким образом, предпосылкой селективного выделения является уже сам состав рассолов.

Это позволяет предложить более широкое использование ионной флотации, так как одним из ограничений ее применения всегда являлся высокий расход реагентов и, соответственно, затраты на технологию, снижающие экономическую привлекательность процесса использования данного вида сырья. Кроме того, использование рассолов с целью комплексного извлечения из них солевой состав-

ляющей значительно снизит отрицательное воздействие на окружающую среду за счет влияния такого Е-фактора ESG-трансформации, как производство отходов, поскольку процесс засоления прилегающей к добывающим предприятиям территории практически неизбежен, хотя и не очевиден на стадии проектирования процессов добычи основного полезного ископаемого [20].

Обеспечение устойчивого развития предприятия достигается вовлечением в переработку накопленных отходов производства. Уменьшение площадей, занятых отходами, а следовательно, снижение негативного их влияния на подсистемы биосферы положительно скажется на здоровье населения, дополнительное сырье обеспечит занятость и достойную работу, дополнительная продукция при условии применения инновационных технологий, обеспечивающих комплексное использование техногенного ресурса, – экономический рост. Немаловажным является фактор применения инновационных технологий на уже существующих градообразующих предприятиях, испытывающих дефицит сырья.

На Южном Урале примером ответственного отношения к окружающей среде (E), высокого уровня социальной ответственности (S) и качества корпоративного управления (G) является экологическая политика Русской медной компании (РМК). Для реализации экологических проектов компании на территориях присутствия учрежден и зарегистрирован экологический фонд Русской медной компании. Его учредителями выступили шесть предприятий Южно-Уральского промышленного кластера Группы РМК: АО «Александринская горнорудная компания», АО «Карабашмедь», АО «Кыштымский медеэлектролитный завод», АО «Михеевский ГОК», АО «Томинский ГОК» и ООО «Промрекультивация».

На протяжении последнего десятилетия Группа РМК активно и успешно занимается экологизацией действующего производства и ликвидацией накопленного экологического вреда, переработкой накопленных отходов. Для производства черновой меди на АО «Карабашмедь» сегодня используют двухстадийный способ получения меди из сульфидных концентратов, состоящий из плавки сырья и последующего восстановления шлака (технологии типа «Isasmelt/Ausmelt»). При производстве меди по этой технологии практически отсутствуют выбросы отходящих газов в атмосферу. Процесс характеризуется быстрым пуском и остановкой плавки, высокой производительностью [22].

Проводится рекультивация территорий, загрязненных тяжелыми металлами. Параллельно запускаются четыре проекта. Уже начат технический этап рекультивации земельного участка размещения отходов бывшей обогатительной фабрики Карабашского медеплавильного комбината.

Рекультивации предшествовала разработка технологических решений, обеспечивающих комплексное решение задачи ликвидации накопленного ущерба и технологическую трансформацию.

Разработка проекта потребовала нестандартных технологических решений, которые освещались в исследовательских публикациях. Для создания на месте хвостохранилища благоустроенного сквера с элементами озеленения предложены водонепроницаемый экран в виде геомембраны из полимерного материала и технология его укладки разработанным универсальным укрывным устройством, применение которого [23] позволит обеспечить полную механизацию работ по укладке.

Для необратимого связывания катионов тяжелых метал-

лов предложена схема рекультивации с использованием композиционного сорбента на основе силикатов кальция, поглощающего катионы и одновременно нейтрализующего почву. Использование композитного сорбента позволяет отказаться от изъятия загрязненной породы, образовать дренажный слой, препятствующий скоплению воды и образованию болот и уменьшить слой плодородного почвенного покрова до 0,3 м [24].

Оценка эффективности рекультивации, обеспечение контроля за зарастанием территории и своевременная помощь зеленым насаждениям должны опираться на использование дистанционного зондирования по предложенным методикам оценки дешифрования данных [25].

Одним из примеров нового подхода к снижению влияния Е-фактора, связанного с образованием отходов, является планомерная работа ПАО «Русал Братск» по возврату в оборот образующихся в электролизных цехах отходов различного состава и крупности, так называемого «смета». Состав его весьма разнороден и содержит в том числе мелкодисперсную пыль, представляющую определенную угрозу здоровью персонала. При этом интерес к его переработке состоит в том, что в смете содержится значительное количество ценных компонентов (Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , AlF_3) [21]. Вовлечение данных отходов в повторное использование для получения алюминия может способствовать снижению себестоимости производства алюминия за счет экономии расходов на первичный глинозем, а также уменьшению объемов отходов, складываемых в шламонакопители. Однако в состав смета входят железо- и кремнийсодержащие соединения, которые при их попадании в электролит оказывают негативное влияние на процесс электролиза [26].

Таким образом, привлекательная возможность использования данного отхода в качестве вторичного глиноземсодержащего сырья требует разработки технологии очистки смета от вредных примесей. При этом задача снижения затрат на производство алюминия требует трансформации технологических способов извлечения кремнийсодержащих соединений, которые обычно включают «мокрые» процессы, в направлении разработки сухих методов разделения техногенного сырья. Результаты проведенных исследований по определению состава и распределению примесей в пробах смета показали возможность применения фотометрического обогащения материала (по цвету). Установлено, что нежелательные примеси же-

леза и кремния концентрируются в темной фазе, содержание в которой железа (в пересчете на Fe_2O_3) достигает более 3,5%, а кремния (в пересчете на SiO_2) – 31%. В то же время светлая фракция содержит соответственно всего 0,18% Fe_2O_3 и 1,06% SiO_2 [21].

Технология фотометрической сепарации внедрена на ПАО «Русал Братск» по инициативе руководства завода и является характерным примером ESG-трансформации, реализующей долгосрочную стратегию компании, направленную на внедрение процессов, позволяющих одновременно достичь повышения эффективности основного производства, решать экологические проблемы и способствовать охране здоровья работников предприятия.

Заключение

Технологические трансформации в сфере переработки техногенных отходов связаны:

- с появлением программного обеспечения и ростом возможностей моделирования сложных систем, анализа влияния факторов на модельные системы, выбора оптимальных параметров технологических процессов;
- комбинированием процессов обогащения и гидрометаллургии;
- развитием адаптационного подхода;
- развитием полиструктурной теории композиционных материалов.

Технологическая трансформация обращения с гидроминеральным сырьем позволяет выйти на новый уровень сложности использования техногенных минеральных ресурсов, что вполне соответствует двенадцатой цели устойчивого развития: «Обеспечение рациональных моделей потребления и производства». Она возможна на основе глубокого теоретического обоснования происходящих физико-химических и структурно-химических процессов в аквальных системах.

Флотационная технология переработки техногенных гидроминеральных ресурсов является одной из наиболее перспективных и отвечающих требованиям ESG-трансформации. Нами теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены технологические параметры селективного извлечения металлов из техногенных вод горного производства и природных рассолов при максимальной степени концентрации металлов в получаемых продуктах с учетом закономерностей фазообразования в процессах ионной флотации и гальванокатолиза.

Список литературы

1. Рыльникова М.В., Струков К.И., Радченко Д.Н., Есина Е.Н. Цифровая трансформация – условие и основа устойчивого развития горнотехнических систем. *Горная промышленность*. 2021;(3):74–78. <https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78>
2. Тебекин А.В., Тебекин П.А., Егорова А.А. Технологические трансформации XXI века как индуцирующий вектор перехода к новому качеству производства. *Теоретическая экономика*. 2021;73(1):42–53. Режим доступа: <http://theoreticaleconomy.ru/index.php/tor/article/view/5>
3. Тебекин А.В., Серяков Г.Н. *Теоретико-методические основы исследования технологических укладов экономики*. М.: Русайнс; 2017. 83 с.
4. Серяков Г.Н., Тебекин А.В. Оценка характера дифференциации и преемственности этапов и фаз технологических укладов. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление*. 2018;(3):8–17.
5. Рукинов М.В. Векторы технологических трансформаций и перспективы безопасного развития экономики России в условиях нового технологического уклада. *Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета*. 2020;(1):7–15.
6. Тебекин А.В. *Стратегический менеджмент*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт; 2020. 333 с.
7. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2020;(4):24–39.

8. Шмаль А.Г. *Факторы экологической безопасности – экологические риски*. Бронницы: МП «ИКЦ БНТВ»; 2010. 192 с. Режим доступа: <http://npf-eos.ru/files/316/factory-ekologicheskoy-op.pdf>
9. Михайлов Б.К. (ред.). *Техногенные минерально-сырьевые ресурсы*. М.: Научный мир; 2012. 236 с.
10. Быховский Л.З., Спорыхина Л.В. Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы – состояние и проблемы освоения. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2011;(4):15–20.
11. Матюшенко Е.Н., Гириков О.Г. Удаление сульфатов из шахтных сточных вод. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021;(4):72–84. Режим доступа: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/caf99b4492147f0eb981545d05a23e057ece3f4d.pdf>
12. Калугина Н.Л., Варламова И.А., Гиревая Х.Я., Бодьян Л.А., Чурляева Н.А. Исследование продуктов химической деструкции полиэтиленгликольтерефталата. *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(1-1):1976. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17953>
13. Авфукова Л.С., Белова Т.П. Сорбционное извлечение ионов цветных металлов из многокомпонентных растворов катионитом КУ-2-8 и его зарубежными аналогами. *Успехи современного естествознания*. 2021;(6):42–48. <https://doi.org/10.17513/use.37639>
14. Качалова Г.С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод. *Вода и экология: проблемы и решения*. 2019;(2):32–39. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.2.32-39>
15. Коваленко К.А. К оценке эффективности использования брусита для обезвреживания мышьяксодержащих вод. *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2019;(2):53–60. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-53-60>
16. Маслбобоев В.А., Макаров Д.В., Ключникова Е.М. Устойчивое развитие горнопромышленного комплекса Мурманской области: минимизация техногенных воздействий на окружающую среду. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;(13(2)):188–200. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200>
17. Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G. Wastewater treatment using natural zeolite materials. *Комплексное использование минерального сырья*. 2021;(2):64–68. Available at: <https://kims-imio.kz/wp-content/uploads/2019/04/2021-2-8.pdf>
18. Медяник Н.Л., Шевелин И.Ю., Какушкин С.Н. Математическое моделирование процесса переработки техногенных минерализованных вод методом напорной флотации. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(2):121–129. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180213>
19. Медяник Н.Л., Леонтьева Е.В. Дифенилгуанидин – перспективный реагент для извлечения золота, серебра при переработке техногенных отходов. *Национальная ассоциация ученых*. 2015;(8-3):117–118.
20. Zelinskaya E.V. Industrial waters as a perspective source of hydromineral raw materials. In: *29th International Mineral Processing Congress, IMPC 2018, Moscow, September 17–21, 2019*, pp. 3003–3011.
21. Burdonov A., Barakhtenko V., Zelinskaya E., Gavrilenko L. To the question of purification of aluminum-containing waste of aluminum electrolyzers. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021;8(1):115–123. Available at: https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/01/14_01.14.Zelinskaya.01_21.pdf
22. Стародубцев И.А., Елохин А.П. К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности. *Глобальная ядерная безопасность*. 2015;(4):15–34
23. Давыдов С.Я., Валиев Н.Г., Апакашев Р.А., Дружинин А.В., Белов В.А. Использование геомембранных экранов на горнопромышленных предприятиях. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2018;(8):16–22. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-8-16-22>
24. Лонзингер А.В., Манторова Г.Ф., Костин А.М. Техногенно-загрязненные земли г. карабаша и способы их рекультивации. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2015;(4):37–40.
25. Рыбников П.А., Черёмухина В.В. Применение данных дистанционного зондирования земли для оценки самозарастания нарушенных земель. *Теория и практика мировой науки*. 2020;(11):56–59.
26. Васюнина Н.В., Дубова И.В., Белоусов С.В., Шарыпов Н.А. Рециклинг сметок электролизного производства алюминия. *Обогащение руд*. 2019;(2):39–44. <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.07>

References

1. Rylnikova M.V., Strukov K.I., Radchenko D.N., Esina E.N. Digital Transformation: a Prerequisite and Foundation for Sustainable Development of Mining Operations. *Russian Mining Industry*. 2021;(3):74–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-91922021-3-74-78>
2. Tebekin A.V., Tebekin P.A., Egorova A.A. Technological transformations of the 21st century as an inducing vector of transition to a new quality of production. *Teoreticheskaya ekonomika*. 2021;73(1):42–53. (In Russ.) Available at: <http://theoreticaleconomy.ru/index.php/tor/article/view/5>
3. Tebekin A.V., Seryakov G.N. *Theoretical and methodological foundations of studying technological modes of economy*. Moscow: Rusains; 2017. 83 p. (In Russ.)
4. Tebekin A.V., Seryakov G.N. Evaluation of the nature of differentiation and continuity of the stages and phases of technological structures. *Bulletin Tver State University. Series: Economics and Management*. 2018;(3):8–17. (In Russ.)
5. Rukinov M.V. Vectors of technological transformations and prospects of Russia's secure development in the new technological paradigm. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta*. 2020;(1):7–15. (In Russ.)
6. Tebekin A.V. *Strategic Management*. 2nd ed. Moscow: Yurait; 2020. 333 p. (In Russ.)
7. Kaplunov D. R., Rylnikova M.V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological structure. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2020;(4):24–39. (In Russ.)
8. Shmal A.G. *Factors of environmental safety - environmental risks*. Bronnitsy: IKTs BNTV; 2010. 192 p. (In Russ.) Available at: <http://npf-eos.ru/files/316/factory-ekologicheskoy-op.pdf>
9. Mikhailov B.K. (ed.). *Technogenous mineral raw material resources*. Moscow: Nauchnyi mir; 2012. 236 p. (In Russ.)
10. Bykhovsky L.Z., Sporykhina L.V. Industrial waste as a reserve to replenish mineral resources: status and development problems. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2011;(4):15–20. (In Russ.)
11. Matyushenko E.N., Girikov O.G. Removal of sulfates from mine wastewater. *News of higher educational institutions. Construction*. 2021;(4):72–84. (In Russ.) Available at: <http://izvuzstr.sibstrin.ru/uploads/publications/caf99b4492147f0eb981545d05a23e057ece3f4d.pdf>
12. Kalugina N.L., Varlamova I.A., Girevaya Kh.Ya., Bodyan L.A., Churlyayeva N.A. Study of the products of polyethyleneglycoltereфthalate's chemical destruction. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;(1-1):1976. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=17953>

13. Avfukova L.S., Belova T.P. Sorption of non-ferrous metals ions recovery from multicomponent solutions by KU-2-8 cation exchanger and its foreign analogues. *Advances in Current Natural Sciences*. 2021;(6):42–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37639>
14. Kachalova G.S. Coagulation and sorption treatment of wastewater. *Water and Ecology*. 2019;(2):32–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2019.24.2.32-39>
15. Kovalenko K.A. Estimation of efficiency of using brucite for decontamination of arsenic containing water. *Interesko Geo-Sibir*. 2019;2(4):53–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2019-2-4-53-60>
16. Masloboev V.A., Makarov D.V., Klyuchnikova E.M. Sustainable development of the mining complex of the murmansk region: minimization of man-made impacts on the environment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(2):188–200. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200>
17. Myrzaliev S.K., Pratama G.N.I.P., Khamidulla A.G. Wastewater treatment using natural zeolite materials. *Complex Use of Mineral Resources*. 2021;(2):64–68. Available at: <https://kims-imio.kz/wp-content/uploads/2019/04/2021-2-8.pdf>
18. Medyanik N.L., Shevelin I.Y., Kakushkin S.N. Mathematical modeling of mineralized industrial wastewater treatment by pressure flotation. *Journal of Mining Science*. 2018;54(2):292–299. <https://doi.org/10.1134/S1062739118023653>
19. Medjanik N.L., Leontyeva E.V. Diphenylguanidine – perspective reagent for the extraction of gold, silver in the processing of technogenic waste. *Natsionalnaya assotsiatsiya uchenykh*. 2015;(8-3):117–118. (In Russ.)
20. Zelinskaya E.V. Industrial waters as a perspective source of hydromineral raw materials. In: *29th International Mineral Processing Congress, IMPC 2018, Moscow, September 17–21, 2019*, pp. 3003–3011.
21. Burdonov A., Barakhtenko V., Zelinskaya E., Gavrilenko L. To the question of purification of aluminum-containing waste of aluminum electrolyzers. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021;8(1):115–123. Available at: https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/01/14_01.14.Zelinskaya.01_21.pdf
22. Starodubtcev I.A., Elokhin A.P. Use of automated systems for environmental monitoring in the area surrounding ferrous, nonferrous metallurgical enterprises and nuclear industry. *Global Nuclear Safety*. 2015;(4):15–34. (In Russ.)
23. Davydov S.I., Valiev N.G., Apakashev R.A., Druzhinin A.V., Belov V.A. The use of geomembrane screens at mining enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2018;(8):16–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-8-16-22>
24. Lonzinger A.V., Mantorova G.F., Costin A.M. Technogenic pollution of land karabash and methods for the reclamation. *Transactions Doklady – Russian Academy of Sciences: Earth Science Sections*. 2015;(4):37–40. (In Russ.)
25. Rybnikov P.A., Cheremukhina V.V. Application of remote sensing data to assess the self-growth of disturbed lands. *Theory and Practice of the World Science*. 2020;(11):56–59. (In Russ.)
26. Vasyunina N.V., Dubova I.V., Belousov S.V., Sharypov N.A. Recycling of electrolytic aluminum production sweepings. *Obogashchenie Rud*. 2019;(2):39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2019.02.07>

Информация об авторах

Шадрунова Ирина Владимировна – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом горной экологии, главный научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: shadrunova@mail.ru

Зелинская Елена Валентиновна – доктор технических наук, профессор, кафедра обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: zelinskaelena@mail.ru

Орехова Наталья Николаевна – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: n_orehova@mail.ru

Горлова Ольга Евгеньевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: gorlova_o_e@mail.ru

Чекушина Татьяна Владимировна – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела горной экологии, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: council-ras@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.12.2022

Поступила после рецензирования: 11.01.2023

Принята к публикации: 12.01.2023

Information about the authors

Irina V. Shadrunova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Mining Ecology Department, Chief Research Associate, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: shadrunova@mail.ru

Elena V. Zelinskaya – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Mineral Processing and Environmental Protection named after S.B. Leonov, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: zelinskaelena@mail.ru

Natalia N. Orekhova – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Leading Research Associate, Mining Ecology Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: n_orehova@mail.ru

Olga E. Gorlova – Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Research Associate, Mining Ecology Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: gorlova_o_e@mail.ru

Tatiana V. Chekushina – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Leading Research Associate, Mining Ecology Department, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: council-ras@bk.ru

Article info

Received: 21.12.2022

Revised: 11.01.2023

Accepted: 12.01.2023