

Управление отходами горнодобывающих предприятий как элемент устойчивой добычи полезных ископаемых

С. В. Иванов

Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Россий-
ской академии наук»,
г. Апатиты
s.ivanov@ksc.ru

Аннотация

Среди проблем, связанных с устойчивой добычей полезных ископаемых и управлением отходами, особо острыми являются вопросы истощения невозобновляемых природных ресурсов, переработки отходов и деградации земель. Большие объемы добычи полезных ископаемых и образование отходов угрожают потребностям будущих поколений и наносят серьезный ущерб окружающей среде. В связи с этим промышленные отходы необходимо рассматривать как вторичные источники ценных материалов. Извлечение этих компонентов из отходов позволит увеличить объемы получаемых металлов и минералов, а также уменьшить образование отходов и снизить долгосрочное негативное воздействие, вызванное разработкой месторождений. Решение этой проблемы требует внедрения новых экономически эффективных методов повторного использования и переработки отходов, которые будут использоваться промышленностью.

Ключевые слова:

горнодобывающие предприятия, устойчивое развитие, промышленные отходы, окружающая среда

Введение

Горнодобывающая промышленность способна оказывать существенное долгосрочное воздействие на окружающую среду, которое сохраняется и после окончания разработки месторождений, в связи с чем проблема устойчивой добычи полезных ископаемых, образования и управления отходами имеет особую остроту и актуальность [1, 2].

Отходы горнодобывающей промышленности включают в себя твердые и жидкие материалы, которые извлекаются из земли и используются на различных стадиях переработки руды и обогащения. Значительное их количество образуется на различных этапах горнодобывающих операций от разведки, переработки полезных ископаемых и до извлечения ценных компонентов. В настоящее время отходы горнопромышленной деятельности считаются непригодным для использования материалом, поскольку не

Mine waste management as an element of sustainable mining

S. V. Ivanov

G. P. Luzin Institute for Economic Studies, Federal Research Centre
Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity

s.ivanov@ksc.ru

Abstract

Among the challenges associated with sustainable mining and waste management, the issues of depletion of non-renewable natural resources, waste recycling and land degradation gain special attention. Large extraction volumes of natural resources and waste generation threaten the needs of future generations and cause major damage to the environment. In this regard, industrial waste should be considered as secondary sources of valuable materials. Extracting these components from waste will increase the volumes of metals and minerals obtained, as well as reduce waste generation and long-term negative impacts caused by mining. The solution of this question requires the introduction of new cost-efficient methods for waste re-using and re-cycling, which will be used by industry.

Keywords:

mining enterprises, sustainable development, industrial waste, environment

содержат концентрацию металлов, представляющую экономический интерес. Поэтому они рассматриваются как нерентабельные и вместо переработки размещаются в местах хранения рядом с горнодобывающим производством, так как их транспортировка в другие места экономически невыгодна [3]. Такие отходы представляют опасность для человека и окружающей среды, находясь в местах хранения, вследствие образования пыли и потенциального выброса содержащихся в них тяжелых и токсичных металлов. Однако отходы содержат различные критически важные компоненты, что делает их огромным источником ценных материалов, которые были созданы в результате горнодобывающей деятельности [1, 4].

Эксплуатация минеральных ресурсов, как правило, ориентирована на максимизацию прибыли для горнодобывающих предприятий, а переработка отходов на се-

годняшний день в значительной степени обусловлена их практическим применением и финансовой отдачей. В связи с этим вопросы управления отходами промышленных предприятий сфокусированы на способе их образования и утилизации. В этом случае рассматривается более широкий контекст переработки отходов, который может включать корпоративную устойчивость, воздействие на окружающую среду, учет государственной политики, переработку и транспортировку, применяемые технологии, экономику, предотвращение и сокращение образования. Стоит отметить, что при определении приоритетов в управлении отходами, предотвращение их образования является наиболее предпочтительным вариантом, а утилизация и обработка – наименее желательными.

Минимизация отходов может быть достигнута путем модификации оборудования, внедрения новых технологий, модификации процесса или замены исходного сырья [5]. Смягчение последствий таких процессов требует комплексного подхода к управлению отходами, который включает сокращение количества отходов и формирование новых рынков [6, 7]. Кроме того, различные параметры, такие как географические, геологические, гидрогеологические и климатические условия, имеют решающее значение для разработки стратегии управления отходами на разных этапах добычи (разведка, транспортировка, переработка и обогащение). Это касается всех типов отходов, связанных с промышленностью: до, во время или после производства и даже после использования потребителями [4].

В связи с тем, что линейная модель потребления ресурсов приводит к высокому уровню промышленных отходов, которые порождают различные экологические проблемы, циркулярная экономика может стать альтернативой, поскольку является восстановительной по своему замыслу, а горнодобывающая и металлургическая промышленность могут быть в нее интегрированы. Циркулярная экономика, переработка и повторное использование были определены как некоторые из новых парадигм, которые могут управлять различными аспектами устойчивости в горнодобывающей и металлургической промышленности. Они направлены на уменьшение линейного потока отходов при помощи переработки и повторного их использования, поэтому ценность ресурсов сохраняется в экономике как можно дольше, а образование отходов сводится к минимуму. Таким образом, циркулярная экономика является обязательной частью более широкой трансформации промышленности в сторону климатической нейтральности и долгосрочной конкурентоспособности [6, 8].

Проблема устойчивой добычи полезных ископаемых

Несмотря на проблему истощения абиотических ресурсов и последующего роста цен, продолжаются обсуждения о том, становится ли такая скорость истощения критической. На данный момент нет никаких непосредственных опасений, и вопрос физического истощения не является критическим, однако ограничения использования ресурсов возрастают.

В конечном итоге это станет вопросом физического и экономического истощения. Экономическое истоще-

ние, а именно момент, когда затраты на добычу ресурса компенсируют его выгоды, является реальной проблемой, которая, вероятно, наступит раньше, чем физическое истощение. Помимо обсуждения того, верны ли прогнозы, реальность постепенного истощения ресурсов уже влияет на промышленность в виде глобальной тенденции снижения качества руды и разработки более сложных месторождений. Это приводит к дополнительному образованию отходов, снижению показателей извлечения минералов, увеличению энергозатрат и водопользования, а также более высоким потерям ценных компонентов [9, 10].

К проблеме истощения ресурсов добавляется тенденция отсутствия устойчивости в горнодобывающих операциях. Горнодобывающие компании в первую очередь эксплуатировали богатые месторождения, не используя низкокачественный материал, что не является устойчивой стратегией. Разработка и внедрение новых технологий позволяют эксплуатировать более бедные и сложные месторождения, однако это может не решить проблему полностью.

Согласно проведенным исследованиям [11], за последние 30 лет только в 25 % случаев добыча полезных ископаемых на определенном месторождении завершается после полного извлечения необходимого ресурса. В остальных случаях разработка месторождений не может считаться устойчивой, поскольку ценный ресурс остается неизвлеченным, а проект не может осуществлять свою деятельность в установленные сроки. Досрочное завершение разработки месторождения приводит к потере рабочих мест, проблемам безопасности и неустраняемым воздействиям на окружающую среду. В этом случае не учитываются возможности использования земель, где размещаются отходы, а ресурс, который не был извлечен, становится нерентабельным для добычи в будущем.

Поскольку исходное сырье является невозобновляемым ресурсом, на устойчивость горнодобывающего проекта существенное влияние также оказывает временная перспектива. Горнодобывающая промышленность не может вести свою деятельность вечно, поэтому по сравнению с другими отраслями изначально занимает более короткий отрезок времени. Наличие устойчивой хозяйственной деятельности имеет большое значение, поскольку добывающие отрасли не могут способствовать устойчивому развитию, если они не могут добиться экономического успеха или даже поддерживать свою жизнеспособность.

Таким образом, устойчивый горнодобывающий проект должен быть способен реагировать на внешние изменения, наиболее распространенным из которых является изменение цен на сырьевые товары [11]. Устойчивая промышленная деятельность должна быть эффективной в использовании ресурсов, позволяя разрабатывать месторождение и полностью извлекать необходимые ресурсы, изменять производство товаров и услуг с меньшими негативными последствиями для окружающей среды, общества и экономики за счет внедрения экологически безопасного способа обработки продуктов, образующихся при добыче металлов и минерального сырья.

Поскольку в 75 % закрытых мест разработки полезных ископаемых находятся значительные объемы ценного материала [11], можно сказать, что минеральные ресурсы не извлекаются максимально эффективно. Кроме того, это приводит к проблемам долгосрочного воздействия на окружающую среду, поскольку необработанный ресурс и все залежи горной породы, по сути, становятся отходами. Хотя горнодобывающие работы по своей сути ограничены во времени, долгосрочное воздействие, которое они оказывают, может длиться сотни лет или фактически вечно.

Внедрение зеленых технологий и экологической эффективности в процессы добычи полезных ископаемых является способом достижения экологической устойчивости в горнодобывающей промышленности. Они могут включать, например, использование возобновляемой энергии за счет сокращения выбросов парниковых газов в процессе переработки. Экономические преимущества зеленых технологий на данный момент могут быть не такими привлекательными, как традиционные или другие технологии, однако было реализовано множество инициатив по повышению их эффективности и снижению затрат. Такой процесс может быть довольно сложным и занять некоторое время, но экологические преимущества зеленых технологий являются долгосрочными и охватывают различные секторы и сферы общественной жизни. При разработке методов добычи для устойчивого развития горнодобывающей промышленности зеленые технологии и экологическая эффективность должны также применяться наряду с наиболее эффективными технологиями добычи. Неизбежно зеленые технологии станут неотъемлемой частью процессов и технологического развития из-за быстро растущего понимания устойчивого развития в современном обществе [10].

Повторное использование и переработка отходов добычи полезных ископаемых

Отходы горнодобывающих предприятий, как правило, практически не имеют экономической пользы на момент их образования, однако могут содержать потенциально ценные минеральные и энергетические ресурсы. При этом изменение обстоятельств, растущий спрос на минеральные и энергетические ресурсы со стороны населения и повышение цен на сырье может превратить отходы в ценный товар и сделать привлекательным их повторное использование в качестве сырья и переработку. Например, разработка и реализация новых технологий может сделать возможным экономически выгодное извлечение металлов, энергии и минералов из отходов, а также преобразование их в полезные продукты. В связи с этим то, что может быть отходами в одной ситуации, может быть очень полезным ресурсом в другой.

Переработка и повторное использование отходов важны с экономической, экологической и промышленной точек зрения, поскольку являются устойчивым вариантом управления отходами с последующим сокращением источника их образования. Это позволяет создать рабочие места, снизить производство отходов и потребность

в добыче полезных ископаемых, стимулировать научные разработки и повысить эффективность использования ресурсов. При решении проблем, связанных с разработкой эффективных процессов и технологических вопросов повторного использования отходов, это также позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду, в том числе продолжительное, которое было создано и накоплено с начала проведения горнодобывающих работ и переработки полезных ископаемых.

Вопросы образования и утилизации отходов горнодобывающей промышленности должны периодически пересматриваться и обновляться. Для переработки отходов горнодобывающей промышленности ключевым моментом является наличие современных технико-экономических, эксплуатационных и экологических исследований в соответствии с местным законодательством. Используемая технология переработки отходов зависит от требуемой производственной мощности, типа и объема получаемого конечного продукта, а также от правил здравоохранения и охраны окружающей среды, применимых к производственному процессу [12]. Некоторые из доступных технологий переработки промышленных отходов требуют огромных капитальных и эксплуатационных инвестиций и не гарантируют даже маржинальной прибыли [13]. Это делает такой вариант менее привлекательным для инвесторов и горнодобывающих компаний и, возможно, способствует их нерешительности в отношении переработки и утилизации отходов, если только не указан длительный срок разработки месторождения [14].

Отходы добывающей промышленности, которые не содержат ценных компонентов, достаточно привлекательных для добычи, могут быть использованы в качестве сырья для других целей. Сельскохозяйственная продукция и строительные материалы, в частности, производство бетонных блоков [15] и кирпича [16] являются основными областями применения таких отходов. Важно найти способы использования вторичных отходов для различных целей на основе их физических и химических свойств, что является первым шагом в оценке потенциала извлечения ресурсов из отходов.

Однако, несмотря на проведенные исследования, касающиеся технологического развития для извлечения ресурсов из таких отходов и высокого спроса со стороны строительной отрасли, они по-прежнему имеют ограниченное коммерческое применение [1, 17, 18]. Такая ситуация возникает из-за причин, касающихся эффективности процесса, включения утилизации отходов в технологическую схему и внедрения зеленых технологий, а также по причине низкой стоимости строительных материалов по сравнению с другими продуктами с более высокой добавленной стоимостью и транспортными расходами [19, 20]. Кроме того, объемы и сложность пустой породы, вскрыши и отходов обогащения значительно различаются в зависимости от производимого товара, физического и химического состава минерализации, а также используемых методов добычи и переработки [21].

Несмотря на растущие усилия по повторному использованию и переработке, отходы, производимые горно-

добывающей и металлургической промышленностью, являются одним из крупнейших потоков отходов в мире, которые, в том числе из-за удаленности этих предприятий, в большинстве случаев захораниваются [21]. В связи с этим, рекультивация мест размещения отходов стала неотъемлемой частью разработки месторождений. Кроме того, негативное воздействие отходов вызывает обеспокоенность относительно того, будут ли усилия по восстановлению таких территорий успешными и защитят ли окружающую среду в долгосрочной перспективе.

Сегодня переработка отходов горнодобывающих предприятий приобретает все большее значение из-за внедрения инновационных технологий, что приносит экономические выгоды и помогает решить экологические проблемы. В некоторых случаях промышленные предприятия способствуют проведению исследований, которые определяют новые и экономически выгодные методы и позволяют увеличить извлечение ценных материалов [22].

Повторное использование и переработка пустых пород

Пустые и вскрышные породы образуются из материалов, залегающих над областью добычи. Они обычно используются для рекультивации мест разработки полезных ископаемых и территорий размещения отходов, в частности для озеленения и восстановления растительности. Среди перспективных направлений повторного использования пустых пород можно выделить строительные материалы, например, бетон, цемент и различные заполнители в строительстве насыпей, плотин, дорог, тротуаров, фундаментов и зданий.

Кроме того, пустые и вскрышные породы могут быть повторно использованы в качестве низкосортных ресурсов ценных минералов и металлов, материалов для засыпки открытых пустот и просадочных земель с целью сокращения отвалов, в качестве материалов для покрытия хранилищ отходов [21, 22]. Однако возможность использования этих альтернативных вариантов зависит от геотехнических, минералогических и геохимических характеристик самих отходов. Например, пиритные отходы могут использоваться в сельском хозяйстве в качестве добавки для нейтрализации неплодородных щелочных почв [23].

Переработка шахтных вод и шламов

Негативное воздействие на окружающую среду и законодательное регулирование в этой области вынуждают промышленные предприятия повторно использовать большую часть сточных вод. В связи с этим на действующих местах добычи повторное использование воды применяется для подавления пыли. Возможность альтернативного применения во многом зависит от химических характеристик воды, например, очищенные шахтные воды могут использоваться в аквакультуре и сельском хозяйстве, для отопления или охлаждения с помощью систем геотермальных тепловых насосов и генерировать электричество [24, 25].

Кислотный дренаж шахт происходит, когда сточные воды с низким pH и высокой концентрацией токсичных элементов сбрасываются в окружающую среду. Месторождение может продолжать генерировать этот процесс

в течение десятилетий даже после прекращения своей работы. Это огромный источник беспокойства из-за его высокого воздействия на окружающую среду. Кислотный дренаж шахт связан с образованием шламов, которые могут использоваться в качестве адсорбционного материала для удаления фосфора из канализационных стоков и сельскохозяйственных сточных вод. Богатые железом осадки и шламы дренажа шахт также могут быть источником железных минералов и промышленных пигментов [26, 27].

Повторное использование и переработка хвостов

За последние десятилетия количество хвостов значительно возросло параллельно с ежегодной добычей, переработкой и использованием минеральных ресурсов. По оценкам, ежегодно во всем мире образуется 5–7 млрд т хвостов горнодобывающей промышленности. При складировании хвостов происходит миграция различных растворенных элементов в поверхностные стоки, почвы, отложения и другие местные экосистемы, что является неизбежной долгосрочной экологической проблемой в горнодобывающей практике во всех странах [28].

Хвосты представляют собой материалы, состоящие из тонко измельченных частиц породы, полученных во время обогащения руд и разделения целевых минералов. Эти отходы могут содержать высокие концентрации цветных металлов и токсичных элементов, но в некоторых случаях могут рассматриваться как важные вторичные источники ценных элементов. Переработка хвостов может быть экономичной по сравнению с обычной добычей, поскольку эти материалы уже прошли измельчение и несколько стадий обработки [29].

Для того чтобы извлеченные ценные компоненты были пригодны для применения, необходимы детальные знания минералогических, геохимических и физических свойств отходов. В настоящее время существует несколько подходов к ресурсам, переработанным из хвостов: извлечение полезных минералов и металлов, производство экономических строительных материалов и производство сельскохозяйственных удобрений. Однако переработка и повторное использование хвостов в качестве материалов для удобрений представляют большую проблему, поскольку эксплуатационные расходы и техническая сложность будут значительно увеличены, а успешное промышленное применение ограничено.

Хвосты могут быть альтернативным сырьем для производства кирпича, цемента, стекла, напольной плитки и фарфора, использоваться в сельском хозяйстве для улучшения структуры почв. Например, хвосты железной руды могут быть использованы в производстве легкой керамики, а песчаные хвосты при смешивании с цементом могут применяться в качестве засыпки для обеспечения опоры грунта или стен. Богатые флогопитом хвосты могут иметь потенциальное применение при очистке сточных вод. Ультраосновные хвосты могут иметь подходящий состав для производства изоляционных материалов из стекла и минеральной ваты. Некоторые хвосты могут быть

размещены в качестве поверхностного покрытия над металлосодержащими или кислотообразующими хвостами. Это создает гидрогеологический барьер и защищает нижележащие отходы от проникновения кислорода и воды.

Тем не менее предлагаемые возможности повторного использования влекут за собой свои собственные проблемы, например, неоднородный состав, сложная минералогия и содержание повышенного количества токсичных элементов могут влиять на физические и химические свойства предполагаемых продуктов и процессов. Это требует основательной оценки потенциального выброса загрязняющих веществ из этих материалов.

Переработка шлаков и отходов алюминиевых руд

Шлаки являются побочным продуктом плавки руды в процессе разделения необходимых металлов от нежелательных элементов. Они обладают уникальными физическими и механическими характеристиками, благодаря которым спектр их применения очень широк. Шлаки, полученные в результате различных пирометаллургических процессов, например, в электродуговой или доменной печи, используются в качестве материала для строительных целей. Кроме того, они используются в производстве цемента, бетона, гравия, кирпича, в качестве дорожного заполнителя, балласта рельсов и мостов.

Отходы алюминиевых руд используются в качестве сырья для извлечения элементов, производства стекла, плитки, цемента, керамики, заполнителя или кирпича. Кроме того, они могут использоваться для очистки сточных вод от красителей и для удаления металлов из раствора, для нейтрализации кислых шахтных вод и удаления из них растворенных металлов и металлоидов, а также для восстановления сульфидных отходов.

Повторное использование и переработка отходов фосфатных руд

Значительный рост добычи фосфатов и потребления удобрений продиктован необходимостью обеспечения продовольствием растущее население мира. Это также привело к росту объема отходов фосфатных рудников, включая пустые породы, хвосты и фосфогипс.

Фосфогипс является основным отходом производства фосфатных удобрений. Повторное использование фосфогипса ограничено из-за переменного состава и содержания в нем фосфатов, кислоты, металлов, радионуклидов, фтора, воды и мелких частиц. Переработка фосфогипса направлена на извлечение полезных компонентов для строительных материалов, таких как гипсокартон, плитка, цемент, искусственный мрамор, стекло. В связи с этим он повторно используется в сельском хозяйстве, рекультивации земель, земляных работах и строительстве с минимальной переработкой или без нее [30]. Фосфатные пустые породы могут быть использованы в ландшафтном дизайне, а также при покрытии и рекультивации хранилищ отходов. Кроме того, из фосфатных хвостов возможно извлечение фосфорной кислоты.

Ограничения, связанные с составом и содержанием, дорогостоящие процедуры извлечения, конкуренция

с синтетическим и более чистым природным гипсом до сих пор препятствовали крупномасштабной переработке и широкому повторному использованию этого типа отходов.

Рекультивация отходов добычи полезных ископаемых

Рекультивация отходов добычи полезных ископаемых возвращает отходы и территории их размещения в состояние, при котором становится допустимо осуществление последующего землепользования. Однако такая возможность зависит от особенностей конкретного участка. В малонаселенных районах хранилища отходов могут быть рекультивированы до уровня, который допускает только ограниченный выпас скота, в то время как в густонаселенных районах рекультивированные отвалы могут стать центрами общественного благоустройства, такими как парки или футбольные поля [31].

Содержание ценных компонентов в некоторых отходах горнодобывающей промышленности требует особых условий их содержания в местах размещения. Для предотвращения миграции твердых и растворенных загрязняющих веществ в окружающую среду, применяются сухие покрытия, которые включают пустые породы, хвосты, глину, почву, органические отходы и различные нейтрализующие материалы, что является эффективной стратегией изоляции этих отходов. Однако характеристики таких покрытий в долгосрочной перспективе зависят от различных параметров, таких как климат, материал, способ строительства, эволюция почвы, экологическая стабильность и растительность. В связи с этим, имеется мало доказательств долгосрочной эффективности спроектированных сухих покрытий, несмотря на тот факт, что, по прогнозам, расчетный срок службы этих систем может составить сотни лет.

Использование растений может способствовать долгосрочному эффективному функционированию и устойчивости сухих покрытий. Растения могут поглощать проникающую воду и защищают покровы от эрозии. Однако необходимо полное понимание характеристик используемой растительности. Например, растения, способные накапливать металлы в своей надземной ткани, могут переносить их в нее из располагаемых ниже отходов благодаря большой глубине проникновения корней, что может быть потенциально опасным для животных, питающихся ими [32]. В результате эффективность такого способа может быть поставлена под угрозу, даже если отходы остаются физически изолированными. В связи с этим интерес для рекультивации территорий добычи полезных ископаемых представляют растения, не накапливающие высокие концентрации металлов в своей биомассе, несмотря на повышенные концентрации металлов в корневом субстрате, что позволяет ограничить их передачу по пищевой цепи. Однако создание покрытий для хранилищ отходов по-прежнему сконцентрировано на свойствах используемых материалов с минимальным вниманием к потребностям роста растительности и их влиянию на характеристики используемого покрытия в долгосрочной перспективе.

Заключение

В связи с растущими запросами общества в отношении защиты окружающей среды, все больше осознается необходимость эффективного использования добываемых ценных компонентов. Проблема управления отходами и рекультивации мест их размещения и разработки месторождений является комплексной и при эффективном подходе будет устранена окончательно, когда для всех типов отходов будут разработаны и внедрены новые методы утилизации, переработки или повторного использования. Однако такое управление ресурсами, когда весь добытый материал используется с пользой, является сложной концепцией. На данный момент многие предложения повторного использования и переработки отходов горнодобывающей промышленности остаются идеями, которые не были приняты промышленностью, ввиду их экономической нецелесообразности. Для этого требуются дополнительные исследования в области геохимии и минералогии для получения знаний, необходимых для определения экономически эффективных вариантов управления отходами, которые будут использованы промышленностью в таких критических областях.

Самой неотложной проблемой является количественное определение и распределение элементов в отходах. Для этого требуется проведение соответствующих научных исследований и разработка прогностических инструментов, таких как моделирование поведения отходов. Кроме того, точное описание химии и минералогии отходов и понимание их поведения в долгосрочной перспективе позволит объяснить возникновение и распределение в них элементов и минералов в отходах в пространстве и времени. Это позволит определить потенциал переработки и повторного использования отходов.

Помимо использования передовых методов для рекультивации территорий добычи полезных ископаемых и мест размещения отходов, необходимо продолжать разрабатывать новые устойчивые, инновационные и экономически эффективные технологии. Это требуется для большей точности в общем описании отходов и мест их размещения, а также понимания того являются ли устойчивыми в долгосрочной перспективе те методы, которые применяются на данный момент.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература / References

1. Lim, B. Technospheric mining of mine wastes: a review of applications and challenges / B. Lim, R. D. Alorro // *Sustainable Chemistry*. – 2021. – Vol. 2. – P. 686–706.
2. Lebre, E. Sustainable practices in the management of mining waste: A focus on the mineral resource / E. Lebre, G.D. Corder, A. Golev // *Minerals Engineering*. – 2017. – Vol. 107. – P. 34–42.
3. Tsukerman, V. A. Environmental policy of resource corporations in commercial mineral production in the Arctic zone of Russia / V. A. Tsukerman, S. V. Ivanov // *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. – 2020. – Vol. 10. – P. 56–66.
4. Falagan, C. New approaches for extracting and recovering metals from mine tailings / C. Falagan, B. M. Grail, D. B. Johnson // *Minerals Engineering*. – 2017. – Vol. 106. – P. 71–78.
5. Basu, A. J. Industrial ecology framework for achieving cleaner production in the mining and minerals industry / A. J. Basu, D. J. van Zyl // *Journal of Cleaner Production*. – 2006. – Vol. 14 (3). – P. 299–304.
6. Matinde, E. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices / E. Matinde, G. S. Simate, S. Ndlovu // *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. – 2018. – Vol. 118. – P. 825–844.
7. Matinde, E. Waste production and utilization in the metal extraction industries / E. Matinde, G. S. Simate, S. Ndlovu // *Taylor & Francis/CRC Press, Boca Raton, FL*. – 2017. – 532 p.
8. Shavina, E. Implementation of environmental principles of sustainable development in the mining region / E. Shavina, V. Prokofev // *Vth International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences*. – 2020. – Vol. 174 (1):02014. – P. 1–6.
9. Lebre, E. Integrating industrial ecology thinking into the management of mining waste / E. Lebre, G. D. Corder // *Resources*. – 2015. – Vol. 4. – P. 765–786.
10. Norgate, T. E. Assessing the environmental impact of metal production processes / T. E. Norgate, S. Jahanshahi, W. J. Rankin // *Journal of Cleaner Production*. – 2007. – Vol. 15. – P. 838–848.
11. Laurence, D. Establishing a sustainable mining operation: an overview / D. Laurence // *Journal of Cleaner Production*. – 2011. – Vol. 19. – P. 278–284.
12. Lemougna, P. N. Recycling lithium mine tailings in the production of low temperature (700–900 °C) ceramics: effect of ladle slag and sodium compounds on the processing and final properties / P. N. Lemougna, J. Yliniemi, A. Ismailov [et al.] // *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 221. – P. 332–344.
13. Jakob, L. What waste management can learn from the traditional mining sector: towards an integrated assessment and reporting of anthropogenic resources / L. Jakob, S. Michal, S. Franz-Georg [et al.] // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 113. – P. 154–156.
14. Kinnunen, P.H.M. Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorisation / P. H. M. Kinnunen, A. H. Kaksonen // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 228. – P. 153–160.
15. Rashad, A. M. Phosphogypsum as a construction material / A. M. Rashad // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 166. – P. 732–743.
16. Ahmari, S. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerisation / S. Ahmari, L. Zhang // *Construction and Building Materials*. – 2012. – Vol. 29. – P. 323–331.
17. Ivanov, S. V. Upravlenie gornopromyshlennymi othodami arkticheskikh promyshlennykh predpriyatii:

- ohrana okryzhayushei sredy i ekonomika proizvodstva [Management of industrial waste from Arctic mining enterprises: environmental protection and production economics] / S. V. Ivanov, V. A. Tsukerman // *Arktika i Sever* [Arctic and North]. – 2024. – № 55. – P. 40–53.
18. Nikolic, I. P. Cleaner production and technical effectiveness: multicriteria analysis of copper smelting facilities / I. P. Nikolic, I. M. Milosevic, N. N. Milijic [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 215. – P. 423–432.
 19. Bodor, M. Laboratory investigation of carbonated BOF slag used as partial replacement of natural aggregate in cement mortars / M. Bodor, R. M. Santos, G. Cristea [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2016. – Vol. 65. – P. 55–66.
 20. Yin, S. Copper recycle from sulfide tailings using combined leaching of ammonia solution and alkaline bacteria / S. Yin, L. Wang, A. Wu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 189. – P. 746–753.
 21. Bian, Z. The challenges of recycling mining and mineral processing wastes / Z. Bian, X. Miao, S. Lei [et al.] // *Science*. – 2012. – Vol. 337 (6095). – P. 702–703.
 22. Lottermoser, B. G. Recycling, reuse and rehabilitation of mine wastes / B.G. Lottermoser // *Elements*. – 2011. – Vol. 7. – P. 405–410.
 23. Castelo-Branco, M. A. Potential use of pyrite as an amendment for calcareous soil / M. A. Castelo-Branco, J. Santos, O. Moreira [et al.] // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1999. – Vol. 66. – P. 363–367.
 24. Banks, D. Heat pumps as a tool for energy recovery from mining wastes / D. Banks, H. Skarphagen, R. Wiltshire [et al.] // *Geological Society Special Publication*. – 2004. – Vol. 236. – P. 499–513.
 25. Dobbie, K. E. Evaluation of iron ochre from mine drainage treatment for removal of phosphorus from wastewater / K. E. Dobbie, K. V. Heal, J. Aumonier [et al.] // *Chemosphere*. – 2009. – Vol. 75. – P. 795–800.
 26. Edraki, M. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches / M. Edraki, T. Baumgartl, E. Manlapig [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2014. – Vol. 84. – P. 411–420.
 27. Tunsu, C. Recovery of critical materials from mine tailings: a comparative study of the solvent extraction of rare earths using acidic, solvating and mixed extractant systems / C. Tunsu, Y. Menard, D. O. Eriksen [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 218. – P. 425–437.
 28. Yin, S. H. Copper recycle from sulfide tailings using combined leaching of ammonia solution and alkaline bacteria / S. H. Yin, L. M. Wang, A. X. Wu [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 189. – P. 746–753.
 29. Williams, A. G. B. Mineralogy and characterization of arsenic, iron, and lead in a mine waste-derived fertilizer / A. G. B. Williams, K. G. Scheckel, T. Tolaymat [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2006. – Vol. 40. – P. 4874–4879.
 30. Pérez-López, R. Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): from phosphate rock ore to the environment / R. Pérez-López, J. M. Nieto, I. López-Coto [et al.] // *Applied Geochemistry*. – 2010. – Vol. 25. – P. 705–715.
 31. Pearman, G. 101 things to do with a hole in the ground / G. Pearman // *Post-Mining Alliance, Eden Project, Bodelva, St. Austell, Cornwall*. – 2009. – 135 p.
 32. Lottermoser, B. G. Trace element uptake by Mitchell grasses grown on mine wastes, Cannington Ag-Pb-Zn mine, Australia: implications for mined land reclamation / B. G. Lottermoser, N. C. Munksgaard, M. Daniell // *Water, Air & Soil Pollution*. – 2009. – Vol. 203. – P. 243–259.

Благодарность (госзадание)

Статья подготовлена в рамках темы НИР FMEZ-2023-0001 «Разработка научных основ устойчивого развития природоэксплуатирующих отраслей Арктической зоны хозяйствования РФ в условиях энергетической трансформации, глобальных экономических и климатических изменений».

Acknowledgements (state task)

The article was prepared in frames of the research topic FMEZ-2023-0001 “Razrabotka nauchnyh osnov ustojchivogo razvitiya prirodoekspluatiruyushchih otrastej Arkticheskoy zony hozyajstvovaniya RF v usloviyah energeticheskoy transformacii, globalnyh ekonomicheskikh i klimaticheskikh izmenenij [Development of scientific foundations for the sustainable development of nature-exploiting industries in the Arctic economic zone of the Russian Federation in the context of energy transformation, global economic and climatic changes]”.

Информация об авторах:

Иванов Станислав Викторович – научный сотрудник Института экономических проблем им. Г. П. Лузина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»; Scopus 57194024976; ORCID 0000-0001-9141-3211 (Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина Федерального исследовательского центра «Кольский

научный центр Российской академии наук»; Российская Федерация, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24а; e-mail: s.ivanov@ksc.ru).

About the author:

Stanislav V. Ivanov – Researcher, G. P. Luzin Institute for Economic Studies, Federal Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Scopus Author ID: 57194024976, ORCID 0000-0001-9141-3211 (24a Fersman str., Apatity, Murmansk Region, 184209 Russian Federation; e-mail: s.ivanov@ksc.ru).

Для цитирования:

Иванов, С. В. Управление отходами горнодобывающих предприятий как элемент устойчивой добычи полезных ископаемых / С. В. Иванов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Экономические науки». – 2025. – № 5 (81). – С. 76–83.

For citation:

Ivanov, S. V. Upravlenie othodami gornodobyvayushchih predpriyatij kak element ustojchivoj dobychi poleznyh iskopaemyh [Mine waste management as an element of sustainable mining] / S. V. Ivanov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Economic Sciences". – 2025. – № 5 (81). – P. 76–83.

Дата поступления статьи: 03.04.2025

Прошла рецензирование: 11.04.2025

Принято решение о публикации: 26.05.2025

Received: 03.04.2025

Reviewed: 11.04.2025

Accepted: 26.05.2025