

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО И ЭКОНОМИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОГО УСТОЙЧИВОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ

П.А. Каунг^{1,2}, А.Е. Исаков³, И.А. Панфилов^{4,5,6}, В.В. Тынченко^{4,5}, А.А. Ступина^{4,5,7}

¹ Научно-технический исследовательский центр Пин У Львин, Мандалай, Мьянма

² НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

⁴ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия,
e-mail: panfilov@sibsau.ru

⁵ Сибирский государственный университет науки и технологий
им. М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия

⁶ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

⁷ Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

Аннотация: Формирование горно-перерабатывающих предприятий, основанных на принципах самостоятельной структуры, предусматривает создание и реализацию следующих основных этапов: добыча полезного ископаемого; обогащение; металлургический передел. Создание условий для непрерывающегося сбалансированного существования горно-перерабатывающей отрасли в условиях безотходного (малоотходного) производства с учетом сохранения экологического баланса является основной идеей для построения устойчивого, регулируемого социально-ответственного предприятия. Необходимо разработать принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов, учет которых на различных этапах (от проектирования до консервации) позволит реализовать предлагаемую идею. Обоснована и представлена принципиальная схема создания безотходного (малоотходного) производства. Разработана принципиальная схема, удовлетворяющая принципам устойчивого экологически сбалансированного развития. Доказана необходимость перехода от традиционных (открытых, подземных и комбинированных) способов отработки месторождений к освоению георесурсов методами физико-химических технологий. Установлено, что создание экологически чистого и социально ответственного горно-перерабатывающего предприятия формируется на стадии проектирования с учетом принципов устойчивого экологически сбалансированного развития и подлежит корректировке в процессе деятельности.

Ключевые слова: геотехнология, устойчивое развитие, горно-перерабатывающее предприятие, экология, окружающая среда, добыча, полезные ископаемые, георесурсы.

Для цитирования: Каунг П. А., Исаков А. Е., Панфилов И. А., Тынченко В. В., Ступина А. А. Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7-1. – С. 159–175. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.

Principles for forming environmentally safe and economically effective sustainable development of geo resources

P.A. Kaung^{1,2}, A.E. Isakov³, I.A. Panfilov^{4,5,6}, V.V. Tynchenko^{4,5}, A.A. Stupina^{4,5,7}

¹ Science and technological research center Pyin Oo Lwin, Mandalay, Myanmar

² NUST MISIS, Moscow, Russia

³ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

⁴ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: panfilov@sibsau.ru

⁵ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

⁶ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

⁷ Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service
of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Zheleznogorsk, Russia

Abstract: Taking into account the independent organizational and financial structuring of the mining and processing enterprise, the production of the main products includes the following main stages: mineral extraction; enrichment; metallurgical processing. Creating conditions for the ongoing balanced existence of a mining and processing enterprise in conditions of waste-free (low-waste) production, taking into account the preservation of the environmental balance, is the main idea of creating a sustainable, regulated socially responsible enterprise. It is necessary to develop principles for the formation of environmentally safe and cost-effective sustainable development of georesources, the consideration of which at various stages (from design to conservation) will make it possible to create an economically profitable, environmentally friendly and socially responsible mining and processing enterprise. The work highlights the foundations for the formation of environmentally safe and cost-effective sustainable development of georesources. A basic scheme for creating waste-free (low-waste) production is substantiated and presented. A schematic diagram has been developed that satisfies the principles of sustainable, environmentally balanced development. The need for a transition from traditional physical and technical technologies for mining deposits to the development of georesources using methods of physical and chemical technologies has been proven. It has been established that the creation of an environmentally friendly and socially responsible mining and processing enterprise is formed at the design stage, taking into account the principles of sustainable environmentally balanced development, and is subject to adjustment in the process of activity.

Key words: geotechnology, sustainable development, mining and processing enterprise, ecology, environment, mining, minerals, georesources.

For citation: Kaung P. A., Isakov A. E., Panfilov I. A., Tynchenko V. V., Stupina A. A. Principles for forming environmentally safe and economically effective sustainable development of geo resources. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7-1):159-175. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_71_0_159.

Введение

С каждым годом человечество производит и потребляет все большее количество продукции. Его жизнедеятельность полностью зависит от добываемых полезных ископаемых. С ростом

потребления увеличиваются объемы добычи ресурсов. Учет изменяющихся реалий (повышение требований к полноте извлечения; необходимость снижения объемов техногенных накоплений; вовлечение в отработку забалансовых за-

пасов; освоение накопленных техногенных образований и др.) накладывает ряд определенных ограничений на организацию производственных процессов по извлечению полезного ископаемого [1, 2]. Ввиду значительного снижения качества добываемого сырья и содержания полезного компонента в нем [3] происходит увеличение отходов горного производства, складированных на поверхности [4, 5].

Процесс накопления различных техногенных отходов на поверхности и размещение их в различных техногенных отвалах и хранилищах происходит не одно десятилетие, даже не столетие. Образование техногенных отходов происходит из-за отсутствия технологий полного извлечения полезного компонента (до нулевого уровня) из добываемых ресурсов, а складирование производилось ввиду отсутствия экологически чистых способов переработки или утилизации [6]. Состояние техногенных отходов в хранилищах или отвалах можно назвать «условно стабильным». В техногенных массивах и хранилищах могут происходить различные геохимические процессы, которые приводят к активации отходов, и происходит образование новых техногенных элементов или соединений. Вновь образовавшиеся техногенные элементы, помимо того, что могут быть достаточно агрессивными, зачастую обладают повышенной мобильностью [6–8]. Таким образом, за пределы техногенных образований распространяется неконтролируемый вынос агрессивных техногенных отходов, которые попадают в среду обитания человека и оказывают негативное влияние на него и экологическую обстановку [6, 8, 9].

Многие исследователи [10] отмечают значительные деградационные изменения окружающей среды, выраженные в отчуждении земель под горнодобыва-

ющие предприятия и складирование отходов; загрязнении поверхностных и грунтовых вод; загрязнении воздуха; нарушении экологического баланса на территории ведения горных работ и прилегающих территориях и др. Деградационные изменения земной поверхности фиксируются при помощи визуально-маркшейдерского контроля [11], который с развитием технологий стал дополняться спутниковыми интерферометрическими технологиями [12].

В связи с этим основным вектором развития общества является реализация принципа концепции устойчивого развития, отражающего перспективы качественного изменения к подходу извлечения полезного ископаемого.

Множество исследований посвящено раскрытию аспектов устойчивого развития и созданию алгоритмов реализации данной концепции [13]. Например, с целью минимизации влияния горного и перерабатывающего производств на окружающую среду в модель геологического блока включались социальные и экологические показатели [14]. Современное проектирование и планирование горных работ основано на блочной геологической модели, согласно которой геология представлена в виде сгенерированных компьютером отдельных участков массива (кубов), объединенных в блоки. Каждому блоку присваиваются характерные признаки с помощью ряда различных методов оценки с учетом технических и экономических параметров, таких как сорт руды (содержание полезного компонента, а также наличие или отсутствие побочных компонентов); способы добычи и переработка затраты; геотехнические характеристики и др. [14]. В работе [13] при выборе эффективных мер, способствующих снижению нагрузки на окружающую среду, учитывались вероятностные последствия от возникновения экологических катастроф.

В исследовании [15] предлагаемая концепция развития горно-перерабатывающей отрасли, обеспечивающая полный цикл разработки георесурсов, позволяет снизить нагрузку на окружающую среду при одновременном росте дисконтированного дохода. Ранее [16] был предложен алгоритм эколого-экономического обоснования вовлечения техногенных отходов в переработку, учитывающий экологические и экономические факторы. При этом в данном исследовании не были учтены социальные факторы. Социальным аскетам, возникающим в регионах добычи полезных ископаемых, где горнодобывающее предприятие является градообразующим, уделено внимание в работе [17]. Однако в данном исследовании при создании модели и расчете совокупного мультипликативного эффекта внедрения малоотходной (безотходной) технологии путем вовлечения в переработку техногенного минерального сырья были учтены только два фактора: критерий максимальной прибыли и социальный показатель, который основывался на увеличении срока работы предприятия и создании дополнительных рабочих мест.

В работе [18] были учтены критерии устойчивого развития горнодобывающего предприятия, осуществляющего извлечение твердого полезного ископаемого подземным способом. Была произведена оценка количественного влияния каждого критерия (экономического, экологического и социального) в отдельности на рассматриваемое предприятие.

Из анализа ранее выполненных работ следует, что направление исследований сосредоточено на мелких деталях, отсутствует четкая систематизация критериев и нет единого алгоритма (или модели), объединяющего все три основных критерия. Имеются слабые попытки выявления факторов, которые оказывают влияние на устойчивое эколого-эко-

номическое развитие горного предприятия, и их систематизации.

Таким образом, совокупный учет всех факторов создания условий для устойчивого развития горного предприятия, определение их взаимосвязи в технологических процессах при формировании полного цикла комплексного освоения георесурсов с целью разработки и реализации концепции сбалансированного развития является весьма актуальной задачей.

От комплексного освоения недр к безотходным (малоотходным) технологиям

Целью современных горно-перерабатывающих предприятий является обеспечение полного цикла производства по выпуску профильной продукции. Поглощение горнодобывающих предприятий более крупными структурными единицами (комбинатом или холдингом) началось примерно с середины прошлого столетия [13]. Создание таких структур позволило воплотить идею комплексного подхода к освоению недр, предложенную академиком В.В. Мельниковым в 1923 г. [19].

В таких крупных структурных единицах формируется единый организационно-финансовый вектор получения конечного продукта в замкнутом цикле его производства [20]. Однако для обеспечения полного (регулируемого) устойчивого развития предприятия в частности и региона в целом создания таких структур недостаточно.

Как следует из анализа ранее проведенных исследований, решение задач обеспечения общества необходимым объемом минеральных ресурсов основано на приведении в равновесие производства и потребления георесурсов с одновременным сохранением и преумножением природного разнообразия недр и экологического потенциала среды.

Современная геотехнология — это сочетание из 18 наук о закономерностях изменения недр Земли в результате воздействия человека и методах их освоения и сохранения [21]. Основной целью горных наук (геотехнология) является пополнение знаний, предоставляющих возможность управления состоянием породного массива недр, при постоянной трансформации их функционального назначения, с учетом сохранения природного равновесия с обязательным применением (внедрением) экологически безопасных устойчивых технологий освоения георесурсов.

Ввиду того, что создание условий устойчивого развития в последнее время является парадигмой развития общества, необходимо разработать и внедрить систему мер, которые минимизируют (в идеале сведут к нулю) антропогенное и техногенное воздействие горно-перерабатывающих предприятий на окружающую среду при сохранении приоритетности качественных показателей (качества жизни) общества [22]. При этом устойчивое и экологически сбалансированное освоение участка недр должно сохранить подход к комплексности освоения недр с одновременным внедрением технологий, восполняющих или увеличивающих минерально-сырьевую базу предприятия (внедрение ресурсо-воспроизводящих технологий) на каждой стадии жизненного цикла предприятия, что позволит исключить техногенное воздействие предприятий горно-перерабатывающего сектора на окружающую среду региона.

Принципы устойчивого и экологически сбалансированного освоения недр и техногенных георесурсов представлены в работах [6, 15].

Комбинированная геотехнология способна обеспечить наилучшие условия устойчивого развития горного предприятия с учетом сбалансированности всех

трех критериев: социального; экологического и экономического. Принципы, обеспечивающие такие условия, приведены в работах [8, 13, 18, 23]. Создание условий для восполнения минерально-сырьевой базы горно-перерабатывающего предприятия, что обеспечивает его непрерывающуюся работу, является основной идеей устойчивого (регулируемого) развития такого предприятия и региона ведения работ. При этом необходимо учитывать, что на каждом этапе технологической цепочки все работы должны осуществляться с учетом формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов. Таким образом, учет все возрастающего влияния экологического и социального факторов необходимо осуществлять еще на стадии проектирования горнодобывающего предприятия.

Меры по формированию экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов при условии социально ориентированного вектора должны включать следующие принципы:

- на всех этапах производственного цикла (прогноз, обоснование, проектирование, реализация) необходимо максимально сохранить равновесное состояние экосистемы;
- обязательный учет возможности естественного восстановления экосистемы при определении максимально допустимой нагрузки на нее;
- компенсация потерь или убыли минерально-сырьевой базы ресурсов предприятия путем своевременного их пополнения;
- разработка и внедрение технологий, учитывающих максимально допустимую нагрузку на экосистему, которые минимизируют убыль или потери геосырья (создание ресурсовозобновляемых технологий);

- извлечение из добываемых руд основных и попутных компонентов до нулевого уровня;

- полный отказ от размещения техногенных отходов на поверхности и использование для размещения отходов техногенные полости, образующиеся в результате ведения горных работ;

- использование техногенных полостей для размещения в них низко кондиционной руды или техногенного сырья с последующим извлечением из них ценного компонента физико-химическими способами;

- вовлечение в отработку техногенных отходов или придание данным отходам свойств, характерных или близких для геосырья;

- обязательный контроль рудничного (отводящего) и атмосферного воздуха, шахтных, подземных и поверхностных вод, почвы и техногенных массивов путем комплексного и системного экологического мониторинга;

- размещение инфраструктурных объектов основного и сопутствующего производств, оказывающих (или способных оказывать) влияние на окружающую среду, в техногенных полостях, образующихся в результате ведения горных работ;

- создание условий общественного регулирования всего процесса недропользования путем объединения разноректорных интересов промышленников, государства и населения.

Ориентация на данные принципы и внедрение их при проектировании горно-перерабатывающего предприятия и его эксплуатации позволит исключить деградационные изменения окружающей среды, выражающиеся в трансформационном вырождении территорий, загрязнении атмосферы и гидросферы в регионах недропользования, и минимизировать объемы образующихся техногенных отходов, что значительно сократит площади, отводимые под их складирование.

Именно с целью комплексной оценки влияния горно-перерабатывающего предприятия на окружающую среду, правильного выбора технологий добычи и переработки, а также последующей их корректировки одним из принципов формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов является обязательный системно-комплексный экологический мониторинг. Оценка воздействия отдельных технологических процессов добычи и передела на окружающую среду и обособленные экологические элементы данной среды позволяет выявить очаги экологической опасности, внести корректировки в технологические процессы, что снизит антропогенное или техногенное давление на среду обитания человека.

До сегодняшнего дня все усилия по охране окружающей среды были направлены на ликвидацию последствий возникновения техногенных (экологических) катастроф и/или снижение влияния техногенных отходов. При этом комплексный и системный экологический мониторинг не только позволяет выявлять очаги экологической опасности, но и доказывает необходимость разработки технологий с минимальным экологическим воздействием.

С целью представления масштабов влияния горно-перерабатывающего производства на экологическую обстановку и получения точных качественно-количественных показателей такого влияния необходима его комплексная оценка, при которой выявляется глубина поражения и масштаб деградационных изменений природной среды. Сравнение таких изменений с максимально допустимыми трансформациями позволяет установить предельные нагрузки на экосистему, которые не нарушают ее способность к самовосстановлению. Знание таких точек невозврата для каждого обособленного

экологического элемента окружающей среды позволит разработать инновационные технологии, которые будут экономически обоснованы, и при окончании эксплуатации месторождения минимизировать расходы на рекультивацию с целью сохранения природной среды и ее способности к самовосстановлению.

Кроме того, выявление инфраструктурных и производственных объектов и технологий, оказывающих наибольшее влияние на экологические элементы окружающей среды, установление доли влияния каждого такого объекта и получение его качественно-количественной оценки является обязательным для системно-комплексного экологического мониторинга. Таким образом, разработка

приоритетных направлений природоохранной деятельности и внесение таких направлений в технологическую цепочку работы предприятия на стадии проектирования или корректировка технологии возможны только при наличии результатов экологического мониторинга.

В свете изменившейся концепции развития общества многие предприятия горно-перерабатывающей отрасли в технологических схемах производства в отдельности или при отработке месторождения в целом воплощают принципы формирования устойчивой экологически сбалансированной геотехнологии.

Принципам формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георе-

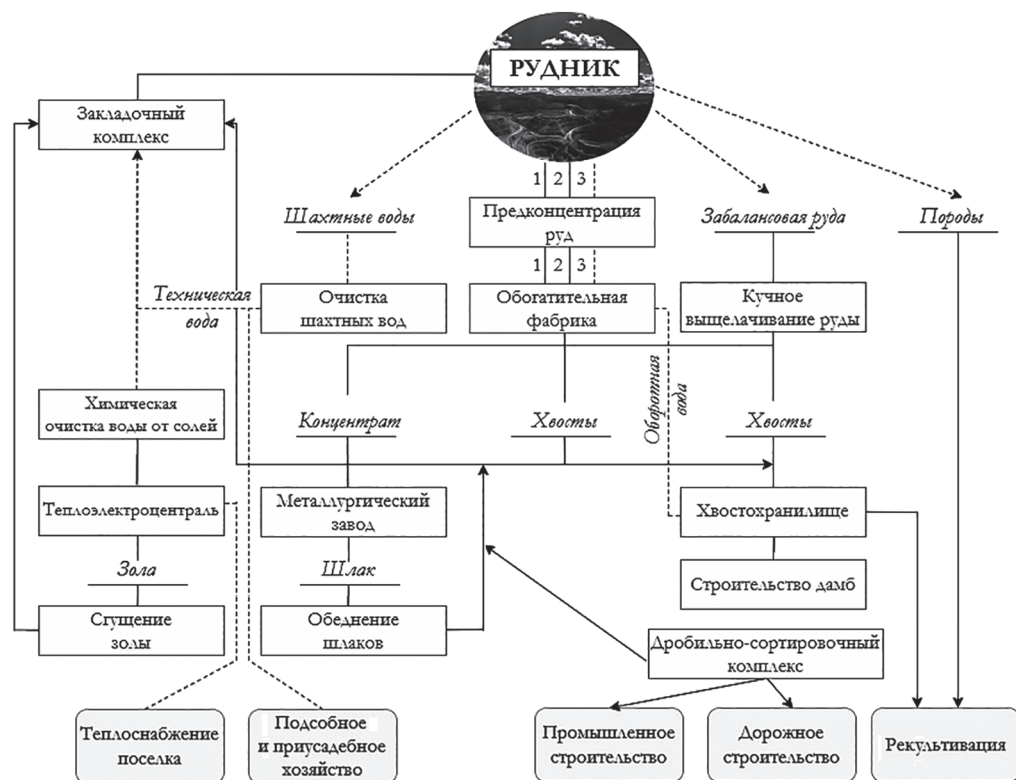


Рис. 1. Принципиальная схема создания безотходного (малоотходного) производства (1, 2, 3 – деление на технологические потоки руд по сортам)

Fig. 1. Schematic diagram of creating waste-free (low-waste) production (1, 2, 3 – division into technological flows of ores by grade)

сурсов при разработке инновационных технологий должно уделяться особое внимание. Во всех фундаментальных и прикладных научных направлениях необходим широкий охват областей исследования, что предопределяет неизбежность проведения междисциплинарных изысканий.

Так, на Бурибаевском ГОКе в повторную отработку вовлекаются лежалые хвосты обогащения медноколчеданных руд. Это позволяет: снизить деградиционную нагрузку на землю; увеличить минерально-сырьевую базу горнодобывающего предприятия (то есть компенсировать убыль запасов в ходе отработки месторождения); иметь дополнительную прибыль от реализации продукции, получаемой в результате переработки техногенных отходов; решить социальные вопросы путем создания дополнительных рабочих мест на угасающем предприятии [24].

На предприятии ОАО «Уралкалий», осуществляющем добычу и переработку калийно-магниевых руд, текущие и лежалые хвосты обогащения, а также глинистые шламы размещают в техногенных подземных полостях, образующихся в результате добычи руд [25]. Таким образом на данном предприятии был решен вопрос уменьшения поверхностных площадей, отводимых для формирования техногенных массивов. Также ввиду удаления с поверхности сухих соляных отходов обогащения значительно уменьшается пыление, что снижает деградацию воздуха, почвы и открытых водоемов.

Как следует из приведенных примеров, на предприятиях реализуется один или несколько основных принципов, которые в основном реализуют создание безотходного (малоотходного) производства.

Принципиальная схема создания безотходного (малоотходного) производства представлена на рис. 1.

Таких примеров реализации отдельных принципов формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого горного производства достаточно. Однако воплощение именно всех озвученных ранее принципов (или большей части) на одном предприятии позволит создать условия для его устойчивого экологически сбалансированного развития.

Устойчивое освоение георесурсов в парадигме экологической безопасности и экономической эффективности

Руды цветных и драгоценных металлов характеризуются низким содержанием (до 5%) полезного компонента. В связи с этим в результате обогащения образуются большие объемы хвостов, занимающие обширные площади. При этом исследованием [24] доказано, что в хвостах обогащения остается достаточное количество извлекаемого ценного компонента.

Таким образом, напрашивается вывод, что максимально целесообразным является размещение перерабатывающего производства непосредственно в подземном руднике. При таких условиях снижаются расходы на транспортировку на поверхность руды, до 95% которой отходит в хвостохранилище после обогащения. Создание условий для утилизации пород от проходческих работ без выдачи их на поверхность — это размещение закладочных комплексов в подземном пространстве. При этом можно объединить два данных технологических процесса в подземном пространстве в единую технологическую цепочку. Возможность заполнения отработанных камер закладочным материалом, созданным на основе техногенных отходов обогащения, и заполнения создаваемого выработанного пространства отходами горно-обогатительного производства

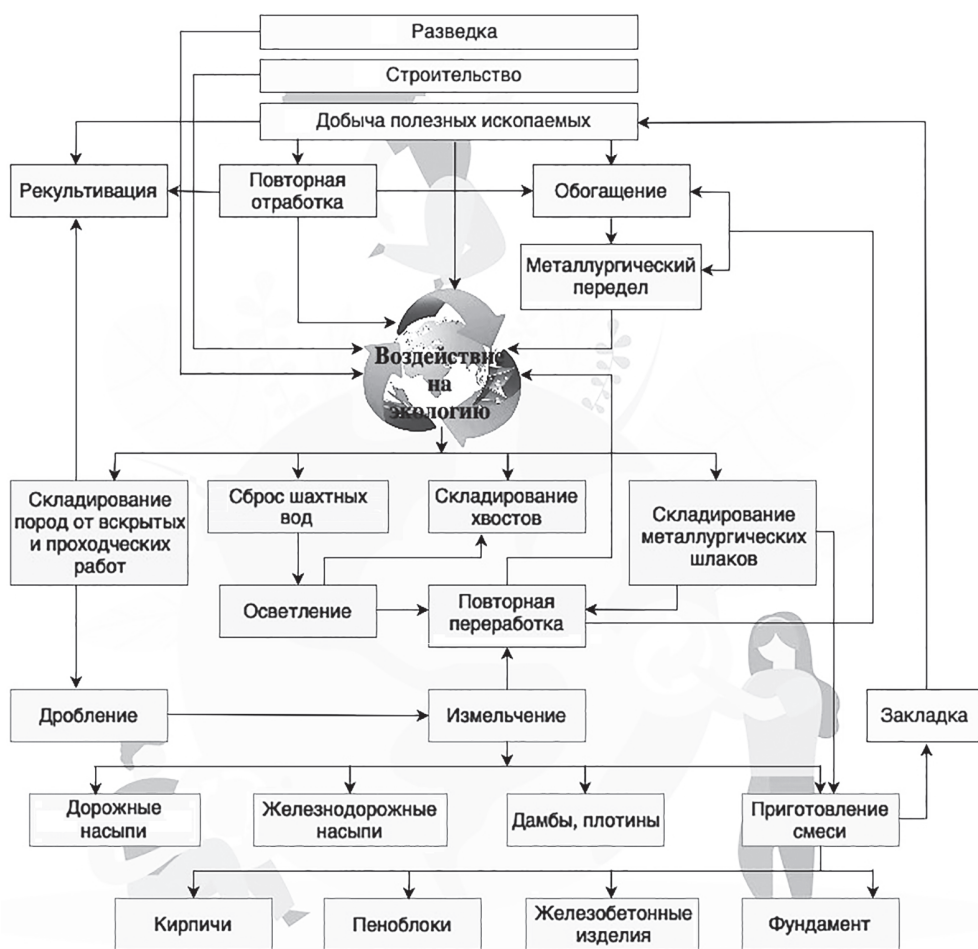


Рис. 2. Схема освоения георесурсов, удовлетворяющая принципам устойчивого экологически сбалансированного развития

Fig. 2. Conceptual diagram that satisfies the principles of sustainable environmentally balanced development

при одновременном снижении воздействия горно-перерабатывающего производства на окружающую среду служит основой объединения.

Также необходимо отметить, что одним из этапов предлагаемого во многих исследованиях [26] физико-химического способа доизвлечения оставленного ценного компонента из техногенных отходов является кучное выщелачивание на поверхности. При выщелачивании обрабатываемый материал подвергается орошению агрессивными растворами. При получении экономического эффек-

та продолжается давление на природную среду. Следовательно, при таких обстоятельствах невозможно говорить о создании устойчивого экологически сбалансированного предприятия. В связи с этим создание подземного комплекса по обогащению добываемой руды и доизвлечению ценного компонента из хвостов обогащения физико-химическими технологиями видится кардинальным ресурсосберегающим решением. В таких комплексах отходы обогащения размещаются в выработанном пространстве и подвергаются орошению химическими

растворами. Таким образом, такие комплексы полностью соответствуют предлагаемым принципам формирования устойчивого экологически сбалансированного предприятия. Зарубежный опыт отработки месторождений подземным способом с применением подземных закладочных комплексов [27] подтверждает эффективность предлагаемых решений.

Принципиальная схема отработки рудного месторождения подземным способом, удовлетворяющая принципам устойчивого экологически сбалансированного развития, продемонстрирована на рис. 2.

Применение данной схемы предусматривает перенос ряда производственных процессов в техногенные полости, образованные в ходе извлечения полезного ископаемого.

Подземные закладочные комплексы имеют следующие преимущества в сравнении с поверхностными:

- прямая (без выдачи на поверхность) утилизация пустой породы;
- минимизация (практически исключение) расходов на доставку и подготовку инертного заполнителя;
- сокращение длины транспортирования закладочного композита от места приготовления к месту укладки;
- снижение капитальных затрат на строительство и поддержание закладочного комплекса;
- уменьшение приведенных эксплуатационных расходов.

В настоящее время научные расчеты и отдельные проектные решения по строительству закладочных комплексов в техногенных полостях подземных выработок подтверждают высказанные предположения о снижении расходов на закладочные работы [27]. Так, проведенные расчеты для проектного предложения по строительству подземного закладочного комплекса доказали снижение

себестоимости в 1,15–1,5 раза за 1 м³ закладочного композита, а в сравнении со строительством закладочного комплекса на поверхности стоимость снижается в 1,2–2,2 раза [27].

Более сложным в сравнении с подземными закладочными комплексами является размещение в подземном пространстве и определение места расположения обогатительных фабрик. Однако в исследовании [28] расчетным путем было определено место расположения подземной обогатительной фабрики для Октябрьского медно-никелевого месторождения. В данном исследовании было доказано, что при подобном размещении обогатительной фабрики заметно снижается острота экологических проблем, так как отходы обогащения размещаются в отработанном пространстве. Помимо решения экологической проблемы, объединение двух технологических процессов (обогащение и приготовление закладочного композита) позволило снизить на 20–30% расходы на доставку инертного заполнителя, представленного отходами обогащения с подземной обогатительной фабрики, на подземный закладочный комплекс, а также расходы на транспортирование готового закладочного композита от места приготовления к месту укладки.

Как следует из представленных отдельных примеров следования принципам устойчивого развития, технологические процессы и производственная деятельность осуществляются в пределах сохранения равновесия устойчивости комплексной эколого-экономической системы.

Предлагаемый подход отработки месторождений традиционными (открытым, подземным и комбинированным) способами с учетом принципов формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов при одновремен-

ной эксплуатации природных запасов месторождений, относящихся к балансовым, позволяет вовлечь в освоение методами физико-химических технологий:

- техногенные георесурсы, образовавшиеся в результате обогатительного и металлургического передела;
- расположенные как в недрах, так и в отвалах пустой породы некондиционные руды или руды сложного вещественного состава;
- забалансовые запасы обедненных руд.

Если твердые техногенные отходы могут достаточно длительное время находиться в статически равновесном состоянии и не оказывать агрессивного влияния на окружающую среду, то жидкие отходы и взвеси (пульпа) обладают большей мобильностью и с момента складирования являются источником нарушения экологического равновесия. Следовательно, вовлечение шахтных вод или стоков перерабатывающих производств в цикличное экологически безопасное и экономически эффективное устойчивое освоение георесурсов является первостепенной задачей, которой необходимо уделить особое внимание.

Практически все жидкие отходы обладают общей минерализацией и имеют кислую или щелочную среду. Следовательно, жидкие минерализованные стоки можно использовать в качестве растворителей или затворителей при подготовке техногенного геосырья к извлечению из него ценного компонента физико-химическими технологиями.

Одновременное освоение природных и техногенных георесурсов комбинированными геотехнологиями является обязательным при внедрении устойчивых экологически сбалансированных технологий, а не вынужденной мерой, позволяющей увеличить срок работы горнодобывающего предприятия за счет от-

работки техногенных отходов физико-химическими технологиями.

Применение техногенных полостей или пространств (отработанных блоков или карьеров) для кучного выщелачивания имеет ряд существенных недостатков ввиду сильной агрессивности растворителей. В подкарьерной зоне в результате отработки месторождений комбинированным способом образуется большое количество техногенных пустот и полостей. Помимо этого, из-за высокой крепости металлических руд их отработка ведется буровзрывным способом. Это предопределяет образование зон с повышенной трещиноватостью вокруг очистных блоков и в областях прикарьерного пространства [29]. В данных условиях затрудняется улавливание продуктивных растворов ввиду повышенной фильтрационной способности в нарушенном массиве. Просачивающиеся растворы через системы трещин или техногенные полости попадают в окружающую среду, что ведет к ее деградации и противоречит принципам экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов. Таким образом, применение физико-химических технологий в техногенных полостях, образующихся в ходе открытых и подземных горных работ, является небезопасным ввиду возможного нанесения вреда работникам подземного рудника и нарушения баланса среды. С этих позиций необходимо отметить, что формирование экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов должно сохранить ранее существовавшие принципы:

- комплексного освоения георесурсов;
- поддержания минерального разнообразия недр Земли.

При этом необходимо отметить, что вовлечение техногенных отходов в замкну-

тый цикл производства и их утилизация после глубокой переработки невозможны без решения дополнительных задач, обеспечивающих сохранение баланса устойчивости природной системы и максимальную экологическую безопасность. Для реализации данных задач необходимо решение следующих вопросов:

- разработка и внедрение инъекционных растворов, устойчивых к агрессивной среде, способных загерметизировать нарушенные зоны вокруг техногенных полостей, при этом обладающих доступностью, как с точки зрения производства, так и с точки зрения цены;
- внедрение экономически обоснованных технологий герметизации несплошности и повышенной трещиноватости приконтурной зоны карьеров и породного массива вокруг очистных блоков для исключения миграции выщелачивающих растворителей и продуктивных растворов в окружающую среду;
- поиск составов растворителей и модифицирующих добавок для них, обеспечивающих избирательную трансформацию ионов металлов в продуктивный раствор, а также обеспечивающих заданную интенсивность и техническую эффективность выщелачивания;
- придание возводимым искусственным массивам таких свойств, как повышенная агрессивная устойчивость и герметичность, при сохранении традиционного назначения;
- расширение области применения механохимической технологии повторной переработки и рационального применения техногенных отходов;
- промышленное внедрение активационных установок (дезинтеграторов) в устойчивые экологически сбалансированные технологии.

Сложность и принципиальная важность решения перечисленных задач при внедрении устойчивых экологически сбалансированных технологий и поставлен-

ных вопросов, разрешаемых для достижения указанных целей, заключается в том, что комплексное освоение георесурсов и формирование экологически безопасного и экономически эффективного, устойчивого их освоения не является функцией последовательного или параллельного сложения. Реализация предлагаемых принципов предполагает создание комплекса мероприятий от строительства рудника до момента его консервации, обеспечивающих полный цикл освоения георесурсов, расширяющих границы понятия «извлечение полезного ископаемого» и включающих, помимо традиционной добычи, извлечение руды низкого сорта или труднообогатимой, а также глубокую переработку техногенных отходов и последующую их утилизацию.

С сохранением концепции комплексности освоения недр принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов обязаны войти в практику извлечения и последующего использования природных и техногенных георесурсов.

Применение сформированных принципов позволит разработать и внедрить инновационные технологии на горно-перерабатывающих предприятиях. При должной адаптации разрабатываемых технологий освоения георесурсов к горно-геологическим условиям отдельно взятого месторождения и их вариативности становится возможным внесение изменений в технологические процессы, что обеспечит экологическую безопасность и экономическую эффективность устойчивого освоения георесурсов на весь срок существования горно-перерабатывающего предприятия.

Заключение

Приверженность к комплексному освоению недр в совокупности с внедрением технологий, обеспечивающих пол-

ный цикл освоения георесурсов, позволит реализовать концепцию устойчивого экологически сбалансированного развития.

Принципы формирования экологически безопасного и экономически эффективного устойчивого освоения георесурсов не могут быть реализованы в рамках отдельно взятого технологического процесса. Предлагаемые принципы определяют реализацию комп-

лекса мер на всех технологических и производственных цепочках от извлечения полезного ископаемого до металлургического передела.

Создание экологически чистого и социально ответственного горно-перерабатывающего предприятия начинается на стадии проектирования с учетом принципов устойчивого экологически сбалансированного развития и подлежит корректировке в процессе деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kongar-Syuryun Ch., Ivannikov A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y.* Geotechnology using composite materials from man-made waste is a paradigm of sustainable development // *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2078 – 2082. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145.

2. *Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A.* Integrated monitoring of slope process in India and Russia // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 572 – 581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.

3. *Vinnikov V. A., Silberschmidt M. G., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Gzogyan T. N.* Environmental resource – Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Environment, Technology, Resources*. 2013, vol. 1, pp. 209 – 215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.

4. *Korshak A. A., Nikolaeva A. V., Nagatkina A. S., Gaysin M. T., Korshak A. A., Pshenin V. V.* Method for predicting the degree of hydrocarbon vapor recovery at absorption // *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 202 – 209. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-202-209.

5. *Зиновьева О. М., Колесникова Л. А., Меркулова А. М., Смирнова Н. А.* К вопросу оценки экологического состояния окружающей среды для достижения устойчивого развития угледобывающих регионов России // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2023. – Т. 15. – № 1. – С. 35 – 43. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.

6. *Хайрутдинов М. М., Каунг П. А., Чжо З. Я., Тюляева Ю. С.* Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий // *Безопасность труда в промышленности*. – 2022. – № 5. – С. 57 – 62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.

7. *Куренков Д. С., Федоров Г. Б., Дудченко О. Л.* Физические основы применения акустических колебаний для интенсификации растворения каменной соли // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2021. – № 5. – С. 45 – 53. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_45.

8. *Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Yu. I.* Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining // *Metallurgist*. 2023, vol. 67, pp. 398 – 408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

9. *Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В.* Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2024. – Т. 16. – № 1. – С. 205 – 216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

10. *Sidki-Rius N., Sanmiquel L., Bascompta M., Parcerisa D.* Subsidence management and prediction system: A case study in potash mining // *Minerals*. 2022, vol. 12, article 1155. DOI: 10.3390/min12091155.

11. *Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J.* Activities of a mine surveyor and a geologist at design bases in a limestone quarry // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 906, no. 1, article 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.

12. *Bacova D., Khairutdinov A. M., Gago F.* Cosmic geodesy contribution to geodynamics monitoring // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 906, no. 1, article 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012074.

13. *Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V.* Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze // Sustainability. 2023, vol. 15, 11671. DOI: 10.3390/su151511671.

14. *Munoz J. L., Guzman R. R., Botin J. A.* Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2014, vol. 5, no. 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJME.2014.058918.

15. *Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganesyana A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D.* Principles of sustainable development of georesources as a way to reduce urban vulnerability // Urban Science. 2024, vol. 8, no. 2, article 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

16. *Емельянов В. Н., Лейзерович С. Г.* Экологически безопасная технология подземной добычи железистых кварцитов КМА // Горный журнал. — 1996. — № 1–2. — С. 67–69.

17. *Obed O., Kenneth J., Albert K. M.* «Small in size, but dig in impact»: Socio-environmental reform for sustainable artisanal and small-scale mining // Journal of Sustainable Mining. 2019, vol. 18, no. 1, pp. 38–44.

18. *Ковальский Е. Р., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Петров Д. Н.* Проблемы и перспективы внедрения многостадийной выемки руды при отработке запасов калийных месторождений // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 349–364. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

19. *Мельников Н. В.* Проблемы использования природных ресурсов. — М.: Изд-во АН СССР, 1967. — 53 с.

20. *Jastrzębska M., Kazimierowicz-Frankowska K., Chiaro G., Rybak J.* New frontiers in sustainable geotechnics new frontiers in sustainable geotechnics // Applied Sciences. 2023, vol. 13, article 562. DOI: 10.3390/app13010562.

21. *Трубецкой К. Н.* Развитие новых направлений в комплексном освоении недр. — М.: ИПКОН АН СССР, 1990. — 11 с.

22. *Botin J. A.* (ed.) Sustainable management in mining operations. The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, 2009, 392 p.

23. *Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremenkov E. A., Sorokova S. N., Mengxi Q.* Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation // Materials. 2023, vol. 16, article 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

24. *Каунг П. А., Семикин А. А., Хайрутдинов А. М., Дехтяренко А. А.* Вовлечение техногенных отходов в переработку — парадигма ресурсного обеспечения устойчивого развития // Устойчивое развитие горных территорий. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 385–397. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397.

25. *Конгар-Сюрюн Ч. Б., Ковальский Е. Р.* Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряженно-деформированное состояние массива // Геология и геофизика Юга России. — 2023. — Т. 13. — № 3. — С. 177–187. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

26. *Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V.* Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn // Materials. 2023, vol. 16, article 7004. DOI: 10.3390/ma16217004.

27. *Carelos Andrade L., Dimitrakopoulos R.* Integrated stochastic underground mine planning with long-term stockpiling: Method and impacts of using high-order sequential simulations // Minerals. 2024, vol. 14, no. 2, article 123. DOI: 10.3390/min14020123.

28. *Konieczna-Fuławka M., Szumny M., Fuławka K., Jaśkiewicz-Proć I., Pactwa K., Kozłowska-Woszczycka A., Joutsenvaara J., Aro P.* Challenges related to the transformation of post-mining underground workings into underground laboratories // Sustainability. 2023, vol. 15, article 10274. DOI: 10.3390/su151310274.

29. *Ишейский В. А., Рядинский Д. Э., Магомедов Г. С.* Повышение качества дробления горных пород взрывом за счет учета структурных особенностей взрываемого массива // Горный ин-

REFERENCES

1. Kongar-Syuryun Ch., Ivannikov A., Khayrutdinov A., Tyulyaeva Y. Geotechnology using composite materials from man-made waste is a paradigm of sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, pp. 2078–2082. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145.
2. Ganapathy G. P., Zaalishvili V. B., Chandrasekaran S. S., Melkov D. A. Integrated monitoring of slope process in India and Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 572–581. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-572-581.
3. Vinnikov V. A., Silberschmidt M. G., Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Gzogyan T. N. Environmental resource — Economized processes of recycling mineral raw materials of complex composition. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Environment, Technology, Resources*. 2013, vol. 1, pp. 209–215. DOI: 10.17770/etr2013vol1.837.
4. Korshak A. A., Nikolaeva A. V., Nagatkina A. S., Gaysin M. T., Korshak A. A., Pshenin V. V. Method for predicting the degree of hydrocarbon vapor recovery at absorption. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 202–209. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-202-209.
5. Zinovieva O. M., Kolesnikova L. A., Merkulova A. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the ecological condition of the environment to achieve sustainable development of coal-mining regions of Russia. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 35–43. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-1-35-43.
6. Khayrutdinov M. M., Kaung P. A., Chzho Z. Ya., Tyulyaeva Y. S. Ensuring environmental safety in the implementation of the resource-renewable technologies. *Occupational Safety in Industry*. 2022, no. 5, pp. 57–62. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.
7. Kurenkov D. S., Fedorov G. B., Dudchenko O. L. Physics of application of acoustic vibrations in stimulation of dissolution of rock salt. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5, pp. 45–53. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_45.
8. Brigida V. S., Golik V. I., Klyuev R. V., Sabirova L. B., Mambetalieva A. R., Karlina Yu. I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023, vol. 67, pp. 398–408. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
9. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoeological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
10. Sidki-Rius N., Sanmiquel L., Bascompta M., Parcerisa D. Subsidence management and prediction system: A case study in potash mining. *Minerals*. 2022, vol. 12, article 1155. DOI: 10.3390/min12091155.
11. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a mine surveyor and a geologist at design bases in a limestone quarry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 906, no. 1, article 012073. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012073.
12. Bacova D., Khairutdinov A. M., Gago F. Cosmic Geodesy Contribution to Geodynamics Monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 906, no. 1, article 012074. DOI: 10.1088/1755-1315/906/1/012074.
13. Malyukova L. S., Martyushev N. V., Tynchenko V. V., Kondratiev V. V., Bukhtoyarov V. V., Konyukhov V. Y., Bashmur K. A., Panfilova T. A., Brigida V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability*. 2023, vol. 15, 11671. DOI: 10.3390/su151511671.
14. Munoz J. L., Guzman R. R., Botin J. A. Development of a methodology that integrates environmental and social attributes in the ore resource evaluation and mining planning. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2014, vol. 5, no. 1, pp. 38–58. DOI: 10.1504/IJMME.2014.058918.
15. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of sustainable development of georesources as a way to reduce urban vulnerability. *Urban Science*. 2024, vol. 8, no. 2, article 44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.
16. Emel'yanov V. N., Leyzerovich S. G. Environmentally friendly technology of underground mining of ferruginous quartzite KMA. *Gornyi Zhurnal*. 1996, no. 1–2, pp. 67–69.

17. Obed O., Kenneth J., Albert K. M. «Small in size, but dig in impact»: Socio-environmental reform for sustainable artisanal and small-scale mining. *Journal of Sustainable Mining*. 2019, vol. 18, no. 1, pp. 38–44.

18. Kovalski E. R., Kongar-Syuryun Ch. B., Petrov D. N. Challenges and prospects for several-stage stoping in potash mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 349–364. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-349-364.

19. Mel'nikov N. V. *Problemy ispol'zovaniya prirodnnykh resursov* [Problems of using natural resources], Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1967, 53 p.

20. Jastrzębska M., Kazimierowicz-Frankowska K., Chiaro G., Rybak J. New frontiers in sustainable geotechnics new frontiers in sustainable geotechnics. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, article 562. DOI: 10.3390/app13010562.

21. Trubetskoy K. N. *Razvitie novykh napravleniy v kompleksnom osvoenii nedr* [Development of new directions in the comprehensive exploitation of bowels], Moscow, IPKON AN SSSR, 1990, 11 p.

22. Botin J. A. (ed.) *Sustainable management in mining operations*. The Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, 2009, article 392.

23. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Brigida V., Efremenkov E. A., Sorokova S. N., Mengxu Q. Tailings utilization and zinc extraction based on mechanochemical activation. *Materials*. 2023, vol. 16, article 726. DOI: 10.3390/ma16020726.

24. Kaung P. F., Semikin A. A., Khayrutdinov A. M., Dekhtyarenko A. A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023, vol. 15, no. 2, pp. 385–397. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-385-397.

25. Kongar-Syuryun Ch. B., Kovalski E. R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023, vol. 13, no. 4, pp. 177–187. [In Russ]. DOI: 10.46698/VNC.2023.34.99.014.

26. Golik V. I., Klyuev R. V., Martyushev N. V., Kondratiev V. V., Tynchenko V. S., Gladkikh V. A., Iushkova L. V., Brigida V. Reuse and mechanochemical processing of ore dressing tailings used for extracting Pb and Zn. *Materials*. 2023, vol. 16, article 7004. DOI: 10.3390/ma16217004.

27. Carelos Andrade L., Dimitrakopoulos R. Integrated stochastic underground mine planning with long-term stockpiling: Method and impacts of using high-order sequential simulations. *Minerals*. 2024, vol. 14, no. 2, article 123. DOI: 10.3390/min14020123.

28. Konieczna-Fuławka M., Szumny M., Fuławka K., Jaśkiewicz-Proć I., Pactwa K., Kozłowska-Woszczycka A., Joutsenvaara J., Aro P. Challenges related to the transformation of post-mining underground workings into underground laboratories. *Sustainability*. 2023, vol. 15, article 10274. DOI: 10.3390/su151310274.

29. Isheisky V. A., Ryadinskii D. E., Magomedov G. S. Increasing the quality of fragmentation of blasting rock mass based on accounting for structural features of massif in the blast design. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9-1, pp. 79–95. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_79.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каунг Пьей Аунг — канд. техн. наук, докторант,
Научно-технический исследовательский центр
Пин У Львин, Мандалай, Мьянма; НИТУ МИСИС,
e-mail: kaungpyae05@gmail.com,

Исаков Александр Евгеньевич — доцент,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
e-mail: Isakov_AE@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1072-4710,

Панфилов Илья Александрович^{1,2} — канд. техн. наук, доцент;
НОЦ Технологии искусственного интеллекта,
Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана, e-mail: crook_80@mail.ru,

Тынченко Валерия Валерьевна^{1,2} — доцент,
e-mail: vvtynchenko@sfu-kras.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9701-7460,
Ступина Алена Александровна^{1,2} — д-р техн. наук,
профессор; Сибирская пожарно-спасательная
академия ГПС МЧС России,
e-mail: h677hm@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

¹ Сибирский федеральный университет,

² Сибирский государственный университет
науки и технологий им. М.Ф. Решетнева.

Для контактов: Панфилов И.А., e-mail: panfilov@sibsau.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kaung Pyae Aung, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral Candidate,
Science and technological research center Pyin Oo Lwin,
Mandalay 05083, Myanmar;

NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia,
e-mail: kaungpyae05@gmail.com,

A.E. Isakov, Cand. Sci. (Eng.),

Empress Catherine II Saint-Petersburg
Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: Isakov_AE@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-1072-4710,

I.A. Panfilov^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

Digital Material Science: New Materials and Technologies,

Bauman Moscow State Technical University,

Moscow, 105005, Russia, e-mail: crook_80@mail.ru,

V.V. Tynchenko^{1,2}, Assistant Professor,

e-mail: vvtynchenko@sfu-kras.ru,

ORCID ID: 0000-0002-9701-7460,

A.A. Stupina^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor;

Siberian Fire and Rescue Academy of State Fire Service

of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

662972, Zheleznogorsk, Russia,

e-mail: h677hm@gmail.com,

ORCID ID: 0000-0002-5564-9267,

¹ Siberian Federal University, 660041, Krasnoyarsk, Russia,

² Reshetnev Siberian State University

of Science and Technology, 660037, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: I.A. Panfilov, e-mail: panfilov@sibsau.ru.

Получена редакцией 07.05.2024; получена после рецензии 31.05.2024; принята к печати 10.06.2024.

Received by the editors 07.05.2024; received after the review 31.05.2024; accepted for printing 10.06.2024.

