ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-1):104-116
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 553.3 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_104

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СЫРЬЯ С ЦЕЛЬЮ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПРИНЦИПАХ КОНЦЕПЦИЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ И ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Н.В. Гончар[1], Е.О. Вегнер-Козлова[2], И.А. Антонова[3], О.М. Гуман[3]

[1] АО «Русская медная компания», Екатеринбург, Россия
[2] Институт экономики УрО РАН, Екатеринбург, Россия
[3] ООО «Уралгеопроект», Екатеринбург, Россия, e-mail: Guman2007@mail.ru

Аннотация: Процесс проектирования освоения недр, рассматривая проблемы обеспечения потребности общества в необходимых минеральных ресурсах, не должен ограничиваться лишь задачами сведения баланса производства и потребления минерального сырья. Требования к современным бизнес-процессам предполагают решение актуальных задач сохранения и увеличения природного богатства и экологического потенциала недр. Важным моментом при использовании отходов горного производства и обогащения является их изучение и подготовка из них закладочного материала для рекультивации отработанных горных выработок месторождений, а также учет геолого-структурных особенностей и положения рекультивируемых объектов в различных структурно-фациальных зонах, обеспечивающих экологическую безопасность и восстановление окружающей среды. Предложена Модель производства при использовании многокомпонентного сырья и одновременной рекультивации земель ближайших месторождений, объединяющая интегрированное и комбинированное производство, в которой на одной обогатительной фабрике будут перерабатываться руды разных генетических групп месторождений (медно-порфировых, колчеданных, медно-скарновых) с извлечением всех попутных полезных ископаемых, а хвосты обогащения будут использованы в качестве закладочного материала при рекультивации близлежащих карьеров или горных выработок.

Ключевые слова: модель комплексного освоения минеральных ресурсов, многокомпонентное сырье, рекультивация земель месторождения полезных ископаемых, закладочный материал, региональные геолого-структурные особенности.

Для цитирования: *Гончар Н. В., Вегнер-Козлова Е. О., Антонова И. А., Гуман О. М.* Модель комплексного использования многокомпонентного сырья с целью восстановления параметров окружающей среды на принципах концепций устойчивого развития и экономики замкнутого цикла // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-1. – С. 104–116. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_104.

The methodology of integrated development of mineral resources in order to restore environmental components

N.V. Gonchar[1], E.O. Wegner-Kozlova[2], I.A. Antonova[3], O.M. Guman[3]

[1] JSC «Russian Copper Company», Ekaterinburg, Russia
[2] Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
[3] «Uralgeoproekt» LLC, Ekaterinburg, Russia, e-mail: Guman2007@mail.ru

Abstract: The article proposes a methodology for the integrated development of mineral resources aimed at solving economic, environmental and social problems. An important point in the use of mining and enrichment waste is the study and preparation of the starting material for the reclamation of spent mining deposits, as well as consideration of geological and structural features and the position of reclaimed facilities in various structural and facies zones that ensure environmental safety and environmental restoration. A production model is proposed using multicomponent raw materials and simultaneous reclamation of the lands of nearby deposits, combining integrated and combined production, in which ores of different genetic groups of deposits (copper porphyry, pyrite, copper-skarn) will be processed at one processing plant with the extraction of all associated minerals, and the tailings of enrichment will be used as a starting material. during the reclamation of nearby quarries or mining operations. Currently, there are no regulatory and methodological acts providing justification for the possibility of recultivation of quarries, mining workings and disturbed lands with enrichment waste, taking into account regional geological and structural features. State economic incentives are needed for more active participation of enterprises in solving waste generation problems and implementing the concept of a circular economy.

Key words: model for the integrated development of mineral resources, multi-component raw materials, land reclamation of mineral deposits, filling material, and regional geological and structural features.

For citation: Gonchar N. V., Wegner-Kozlova E. O., Antonova I. A., Guman O. M. The methodology of integrated development of mineral resources in order to restore environmental components. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-1):104-116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_121_0_104.

Введение

Рост комплекса экономических, социальных и экологических проблем побудил мировое сообщество к официализации направления, названного «устойчивое развитие» (УР). Это направление признано в качестве концепции, основные положения которой нашли свое отражение в совокупности 17 целей, принятых в 2015 г. и направленных на улучшение качества жизни мирового сообщества к 2030 г. Термин «устойчивое развитие» на международном уровне был закреплен в рамках Конференции ООН по окружающей среде и развитию (ЮНСЕД), прошедшей в Рио-де-Жанейро (называемой «Саммит Земли») в 1992 г. В результате указанного мероприятия появилась Декларация по окружающей среде и развитию, в которой были зафиксированы обязательства стран относительно ключевых принципов, позволяющих им достичь устойчивого развития. В 2001 г. были определены так называемые «цели развития тысячелетия» (ЦРТ), действовавшие до 2015 г. Логическим продолжением ЦРТ стали цели устойчивого развития (ЦУР), которые в настоящий момент являются ключевым ориентиром развития стран. Значительное внимание в рамках концепции устойчивого развития уделяется проблемам экологии, что способствует эволюции новых векторов эколого-экономических исследований, направленных на совмещение экономической эффективности и экологической безопасности, что нашло отражение в таких концептуальных направлениях эколого-экономического развития, как концепция ESG, экономика замкнутого цикла (ЭЗЦ) (она же циклическая или циркулярная экономика (ЦЭ)) и Индустрия 5.0 (табл. 1).

Экономика является частью многофакторной природно-социальной систе-

Таблица 1

Взаимосвязь эколого-экономических концепций в рамках парадигмы устойчивого развития
Interrelation of ecological and economic concepts within the framework of the paradigm of sustainable development

Наименование концепции		**Характеристика**
Устойчивое развитие предусматривает достижение 17 целей и 169 задач в течение пятнадцатилетнего периода. Концепция предполагает сохранения уровня удовлетворения потребностей нынешнего поколения, при условии сохранения этой возможности для следующих поколений. В рамках концепции подразумевается переход к «социо-природному устойчивому развитию как средству предотвращения экологической и других глобальных антропогенных катастроф и хаотической деградации» [1]	ESG (environmental, social, and corporate governance)	Предполагает комбинацию экологических, социальных и управленческих нефинансовых показателей, характеризующих результативность и эффективность экономической детальности
	Экономика замкнутого цикла	Позволяет расширить границы экологической устойчивости за счет преобразования продуктов и отходов, результатом которого является эффективное взаимодействие между безопасностью экологических систем и стабильностью экономического роста. В общем виде, экономика замкнутого цикла в рамках логической модели предполагает два подхода: – минимизацию использования ресурсов и вторичную переработку; – экологизацию производств и снижение негативного воздействия на окружающую среду
	Индустрия 5.0.	Определяющими характеристиками концепции стали: «устойчивость», «ориентация на человека», «жизнестойкость». Направление подразумевает ориентацию промышленной отрасли на достижение не только коммерческих, но и общественных целей, выходящих за рамки создания рабочих мест и экономического роста. «Заставляя производство уважать границы планеты и ставя благополучие работников отрасли в центр производственного процесса» [2]
	Зеленая экономика	Относится к типу экономики, ориентированному на здоровое функционирование экосистем Земли при одновременном достижении устойчивого экономического роста, роста благосостояния и создания новых рабочих мест

мы, с взаимосвязанными, но не всегда предсказуемыми в своем развитии компонентами [3], что предполагает необходимость ее эффективного институционального регулирования. Мировая практика нормативно-правового оформления перехода к социо-природной устойчивости активно развивается в течение последних десятилетий: в 2002 г. в Японии принят «Основной закон для формирования общества, ориентированного на переработку»; в Китае в 2009 г. принят закон «О стимулировании циркулярной экономики»; Германия была одной из первых стран, принявшей законы о замкнутом цикле материалов и об управлении отходами. В 2015 г. Европейская комиссия содействовала выпуску Европейского пакета документов, который поддерживал внедрение передовых практик УР [4].

Актуальные векторы эколого-экономического развития, определяемые через таргетированные показатели, детерминируются целями устойчивого развития, ориентированными на достижение стабильной социо-эколого-экономической интеграции [5]. Как показывает практика, в настоящее время ESG-отчетность становится обязательной составляющей бизнес-деятельности, превращаясь в эффективный инструмент достижения задач, соответствующих целям и принципам устойчивого развития. Наряду с этим наблюдается усиление требований к ESG-отчетности и практике, обусловленным формализацией нефинансовой отчетности, что подразумевает перспективное высокоэффективное планирование производственных процессов в контексте дискурса УР и ESG-концепции.

При этом отмечается, что «достоинства «зеленой» стратегии развития экономики предполагают продуманный, дифференцированный и поэтапный подход с учетом производственно-технологической, социально-экономической и природно-географической специфики различных отраслей, регионов и государств» [6]. Также следует обратить внимание, что УР до настоящего времени рассматривалось односторонне, через призму целей и задач, декларируемых институтами ООН, что в большей степени соответствовало интересам глобализма. Однако геополитические события способствовали кристаллизации направления, в рамках которого устойчивое развитие должно быть ориентировано на приоритет национальных задач и интересов [7].

Все вышесказанное позволяет утверждать, что мировой тренд ориентации на устойчивое развитие и «зеленую» экономику предполагает, что сохранение конкурентоспособности крупного промышленного бизнеса, связанного с добычей полезных ископаемых и обработкой цветных металлов, подразумевает высокоэффективную интеграцию в производственные процессы нарративов концепции устойчивого развития. Что обуславливает актуальность развития теории проектирования освоения недр с позиций, учитывающих дискурс устойчивого развития.

Теория вопроса

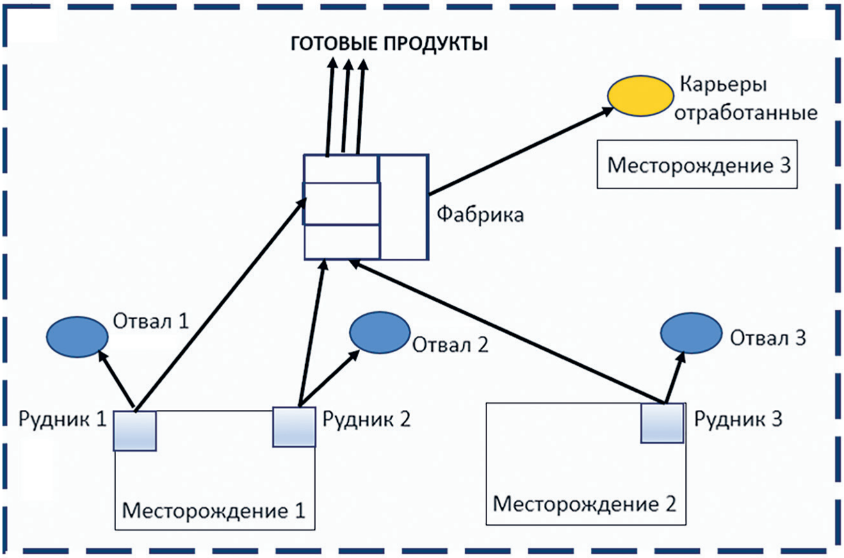
Теоретико-методологические аспекты развития промышленности в контексте устойчивого развития, зеленой и циркулярной экономики активно обсуждаются как в зарубежных, так и в российских источниках. Изначально ЭЗЦ определена как промышленная система, которая является восстановительной или регенеративной [8]. Циклическая экономика — инициатива УР, направленная на снижение линейности общественных систем производства и потребления [9]. ЦЭ предполагает построение экономической деятельности на принципах возобновления ресурсов и здоровьесбережении социо-эколого-экономической системы [10]. Под ЦЭ понимается экономика, для которой характерна минимизация потребления первичного сырья и объемов перерабатываемых ресурсов, которая сопровождается снижением отходов, направляемых на захоронение, при одновременном сокращении площадей, занимаемых соответствующими полигонами и неорганизованными свалками [11]. Принципы 1–10 ЦЭ изложены в работе Kirchherr et al. [12]. Работа [13] расширяет перечень принципами 11–13 (табл. 2).

Учитывая вышесказанное, процесс проектирования освоения недр, решая проблемы обеспечения потребности общества в необходимых минеральных ресурсах, не должен ограничиваться лишь задачами сведения баланса производства и потребления минерального сырья. Требования к современным бизнес-процессам предполагают решение актуальных задач сохранения и увеличения природного богатства и экологического потенциала недр. С этих позиций комплексное освоение недр предусматривает совокупное наличие двух неотъемлемых условий — это безотходное (малоотходное) использование всех вовлекаемых в ходе освоения участка недр минеральных ресурсов и извлечение их оптимальным и рациональным сочетанием технологических процессов и обо-

Таблица 2

Принципы циркулярной экономики «R»
Principles of circular economy «R»

№	Принципы «R» циркулярной экономики		Характеристика
1	Refuse	Отказ	Перевод продукта в категорию излишества. Отказ от продукта или перенос его функций на другой продукт
2	Rethink	Пересмотр	Повышение эффективности использования продукта
3	Reduse	Сокращение	Потребление меньшего количества природных ресурсов и материалов
4	Reuse	Повторное использование	Повторное использование продукта, который выполняет свою первоначальную функцию
5	Repair	Ремонт	Ремонт и обслуживание продукта
6	Refurbish	Модернизация	Восстановление и обновление продукта
7	Remanufacture	Реконструкция	Изменение параметров продукта, использование частей устаревшего продукта в новом продукте
8	Repurpose	Перепрофилирование	Перенаправление использованного продукта в другую область использования
9	Recycle	Рециклинг (переработка)	Вторичная переработка
10	Recover	Восстановление	Сжигание материалов с рекуперацией энергии
11	Regeneration	Регенерация	Восстановление материалов и энергии для их повторного использования
12	Recuperation	Рекуперация	Подразумевает возвращение части материалов или энергии для повторного использования
13	Reclamation	Рекультивация	Экологическое и экономическое восстановление земель и водных ресурсов



Модель комплексного использования многокомпонентного сырья при одновременной рекультивации земель ближайших месторождений

A model for the integrated use of multi-component raw materials, combined with the reclamation of nearby deposits

рудования при различных способах добычи. Причем одно без другого либо невозможно, либо явно неэффективно при вовлечении монотехнологий в промышленную разработку всех запасов месторождения [14]. Что соответствует теоретическим принципам циклической экономики.

Понятие «комплексное освоение» означает, что участок недр, содержащий несколько геологических ресурсов, должен разрабатываться с учетом их совокупности, либо одновременно, либо последовательно, либо одного из них, но с обязательным сохранением для использования всей группы присутствующих на участке геологических ресурсов. Разновидности моделей производств при использовании многокомпонентного сырья предложены в работе [15]. Выделяются следующие модели производств: индивидуальное (монопродуктовое), интегрированное (конгломерат), комбинированное (комплексное). Во всех предложенных моделях отходы обогатительных фабрик размещаются на хвостохранилищах. Мы предлагаем объединить интегрированное и комбинированное производства, т.е. перерабатывать на одной обогатительной фабрике руды разных генетических групп месторождений (медно-порфировых, колчеданных, медно-скарновых) с извлечением всех попутных полезных ископаемых, хвосты обогащения использовать в качестве закладочного материала при рекультивации близлежащих карьеров или горных выработок [16].

Модель производства при использовании многокомпонентного сырья с извлечением всех попутных полезных ископаемых и одновременной рекультивации земель ближайших месторождений предложена на рисунке.

Подобная модель является разновидностью циркулярной экономики, особенно она важна в условиях добычи полезных ископаемых как наиболее отходообразующего вида экономической деятельности [17].

Это позволит добиться реализации концепции устойчивого развития, которая означает интеграцию деятельности в следующих трех ключевых областях [18]:

• технико-экономическая деятельность, обеспечивающая экономический рост;

• экологическая, обеспечивающая защиту окружающей среды;

• социальная, означающая заботу о персонале и развитие сообщества в области горнодобывающей промышленности.

Таким образом, проблемы эффективного и безопасного освоения минерально-сырьевых ресурсов планеты в целом и России в частности выходят за рамки горного производства, более того, они могут быть решены с участием не только геологов, горняков, металлургов, экономистов, но и специалистов других отраслей [19, 20]. Основные принципы методологического подхода к решению задачи комплексного освоения недр следующие: системность, всесторонность, междисциплинарность, инновационная направленность.

Обсуждение результатов

Одним из успешных примеров реализации модели комплексного использования является проект ликвидации Коркинского угольного разреза с использованием закладочного материала, приготовленного на основе хвостов обогащения Томинского ГОКа. Проект строительства Томинского горно-обогатительного комбината включен в «Стратегию развития цветной металлургии России на 2014 – 2020 гг. и на перспективу до 2030 г.» (приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 5 мая 2014 г.). Для отработки месторождения создано АО «Томинский ГОК», которое начало горные работы в 2017 г. Проектная производственная мощность ГОКа по сырой руде — 45 млн т. К наиболее значимым достоинствам проекта можно отнести использование хвостов обогащения в производстве закладочного материала для заполнения и рекультивации Коркинского разреза, в последние годы являющегося источником техногенных, экологических и социальных проблем. Размещение закладочного материала в выработанном пространстве разреза позволит ликвидировать эндогенные пожары, снизить риск оползневых явлений, сократить размеры карьерной выемки, глубина которой достигает около 500 м.

На ГОКе внедрены наилучшие доступные технологии, которые позволяют обогащать медную руду с содержанием меди ниже 0,3%. С начала отработки месторождения (2017 г.) добыто свыше 150 млн т руды, с момента запуска обогатительной фабрики в 2020 г. произведено более 450 тыс. т меди в концентрате (tomgok.ru).

Модель комплексного использования многокомпонентного сырья базируется на правилах, алгоритмах, приемах практического выполнения, способах, путях теоретических исследований, которые шире задач горного производства.

Модель комплексного использования многокомпонентного сырья направлена на практическое внедрение концепции устойчивого развития и включает несколько этапов, реализующихся в условиях существующей институциональной среды и соответствующей ресурсной базы:

1. оценка объема и качества запасов, степени их разведанности, условий залегания, качественной и технологической характеристики, принятие решения о целесообразности их комплексного освоения;

2. обоснование способа разработки глубокозалегающего месторождения и возможности (целесообразности) пере-

хода от открытого к подземному или комбинированному способу;

3. обоснование границ карьера, его глубины, углов откоса бортов, последовательности развития рабочей зоны, выделение этапов разработки;

4. формирование транспортной системы карьера во взаимосвязи с развитием карьерного пространства и его рабочей зоны, применение новых видов технических средств и схем транспорта;

5. обоснование схем обогащения с учетом использования сырья разных генетических групп месторождений и возможности извлечения попутных полезных компонентов;

Таблица 3

Нормативно-правовые акты оценки объема и качества запасов
Regulatory legal acts for assessing the volume and quality of stocks

№ п/п	Нормативно-правовые акты, обеспечивающие комплексное освоение минеральных ресурсов	Этапы комплексного освоения месторождений
1	Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 № 37-р	1
2	Классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (приказ МПР РФ от 11.12.2006 № 278)	1
3	Правила подготовки проектной документации на проведение геологического изучения недр и разведки месторождений полезных ископаемых по видам полезных ископаемых № 352, 2016 г.	2
4	Методические рекомендации по технико-экономическому обоснованию кондиций для подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых. Кроме углей и горючих сланцев № 37-р, 2007 г.	1, 2
5	Методические рекомендации по комплексному изучению месторождений и подсчету запасов попутных полезных ископаемых и компонентов (рекомендованы к использованию протоколом МПР России от 03.04.2007 № 11-17/0044-пр)	1
6	Методические рекомендации по сопоставлению данных разведки и разработки месторождений твердых полезных ископаемых (Рекомендованы к использованию протоколом МПР России от 03.04.2007 № 11-17/0044-пр)	1, 2
7	Методические рекомендации по геофизическому опробованию при подсчете запасов месторождений металлов и нерудного сырья. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 № 37-р	1
8	Правила подготовки, согласования и утверждения технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых, технических проектов строительства и эксплуатации подземных сооружений, технических проектов ликвидации и консервации горных выработок, буровых скважин и иных сооружений, связанных с пользованием недрами, по видам полезных ископаемых и видам пользования недрами, утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2021 года № 2127	2
9	Правила подготовки технических проектов разработки месторождений углеводородного сырья, утверждены Приказом Минприроды России от 20.09.2019 № 639	2

6. обоснование возможности использования отходов обогащения в качестве полезного рекультивационного (закладочного) материала;

7. поиск и обоснование возможности использования отработанных горных выработок других месторождений для приема закладочного материала с учетом свойств геологической среды и результатов анализа региональных структурно-фациальных зон.

Под институциональной средой понимается система нормативно-правовых актов, регулирующих процесс реализации каждого из этапов методики. Если для первых пяти этапов алгоритмы и приемы практического выполнения обеспечены нормативно-правовыми актами, пункт шесть, как правило, реализовывается в рамках теоретических и модельных (лабораторных) исследований [20], то пункт семь не имеет нормативно-правовых актов, обеспечивающих безопасное размещение закладочного материала, большей частью ниже уровня подземных вод. В табл. 3 в качестве примера приведены действующие нормативно-правовые акты, обеспечивающие реализацию в основном первого и второго этапов.

Алгоритм действия шестого этапа при обосновании возможности использования отходов обогащения в качестве полезного рекультивационного материала предполагает изучение:

- химического состава этого материала (валовые, подвижные и водорастворимые формы элементов и соединений);
- их физико-механических свойств;
- химического состава рекультивационных материалов при добавлении химических реагентов (например, гашеная известь);
- физико-механических свойств при добавлении химических реагентов.

Теоретические исследования седьмого этапа для поиска и обоснования возможности использования отработанных горных выработок других месторождений для приема закладочного материала должны включать:

- изучение свойств геологической среды и анализ региональных структурно-фациальных зон;
- изучение взаимодействия закладочного материала с водными потоками (поверхностными и подземными) в горных выработках, карьерах, выемках, нарушенных землях;
- изучение объемов рекультивируемых объектов и моделирование критических объемов при их заполнении закладочным материалом;
- контроль процесса заполнения, мониторинг компонентов окружающей среды и использование объектов-аналогов в однотипных структурно-фациальных зонах.

В работе [21] предложено ввести экологические ограничения в связи с ростом территорий, относящихся к нарушенным землям, и разработать для локального уровня территорий экологические нормативы, направленные на защиту природной среды. Считаем, что такие ограничения при использовании отходов обогащения в качестве закладочного материала при рекультивации нарушенных земель должны базироваться на знаниях о свойствах геологической среды, начиная с анализа региональных структурно-фациальных зон, свойств геологической среды до отработки месторождения и возможностей в процессе заполнения карьеров, как минимум, не «ухудшить» экологическую обстановку вокруг горных выработок.

Целесообразность учета региональных геологических особенностей при планировании деятельности по рекультивации с использованием отходов, в том числе и продуктов обогащения, должна быть положена в основу нормативно-правовых актов при реализации

6-го и 7-го этапов. Нами изучались некоторые месторождения полезных ископаемых, расположенные в зоне сочленения горно-складчатого Урала и платформенных отложений Западно-Сибирской плиты (Теченское скарново-магнетитовое, Султановское медно-колчеданное, Томинское, Михеевское медно-порфировые, Тыньинское марганцевое, Коркинское буроугольное). Эти месторождения характеризуются наличием покровных толщ кайнозойского возраста различной мощности, которые препятствуют унаследовательности геохимических аномалий рудных зон (палеозойского и мезозойского возрастов) в почвах, что проявляется в удовлетворительном экологическом состоянии почв. Водоносные горизонты верхних этажей отличаются повышенной водообильностью и водопроводимостью в отличие от подстилающих пород, что приводит к нейтрализации кислых вод триас-юрских и палеозойских вод за счет процессов нейтрализации и разбавления металлоносных рудных вод. Открытые горные выработки переходных зон от геосинклинальных областей к платформенным целесообразно использовать в качестве объектов размещения отходов или искусственного закладочного материала, с заполнением их до подошвы кайнозойских отложений, в которых формируются водоносные горизонты, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Региональное направление палеозойского и мезозойского подземного стока имеет восточное направление, в сторону погружения складчатых структур Урала под осадочные отложения платформы, что снижает экологические риски в зоне потенциального влияния рекультивируемых горных выработок.

Заключение

В исследовании предложена модель комплексного использования многокомпонентного сырья, направленная на практическое внедрение концепции устойчивого развития, определены этапы реализации модели, рассмотрен практический кейс применения предложенной модели, сформулированы институциональные барьеры ее реализации. В настоящий момент отсутствуют нормативно-правовые и методические акты, обеспечивающие обоснование возможности рекультивации карьеров, горных выработок и нарушенных земель отходами обогащения с учетом региональных геолого-структурных особенностей. Необходимо государственное экономическое стимулирование для более активного участия предприятий в решении проблем отходообразования и реализации концепции циркулярной экономики, в связи с тем, что реализация подобных проектов решает две значимые задачи — модернизацию процессов использования многокомпонентного сырья и соответствие субъектов хозяйственной деятельности заданному мировому треку, ориентированному на устойчивость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Урсул А. Д.* Становление устойчивой цивилизации: новые глобальные цели // Философия и общество. — 2016. — № 1. — С. 29 – 56.

2. *Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L.* Industry 4.0 and Industry 5.0 — Inception, conception and perception // Journal of Manufacturing Systems. 2021, vol. 61, pp. 530 – 535.

3. *Kudelas D., Domru E., Stoianov A., Peters D.* International experience, principles and conditions for the transition to a «green economy» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 41, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/20184104023 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/

publication/325991139_International_Experience_Prin ciples_and_Conditions_for_the_Transition_to_a_Green_Economy.
4. *Silvestri F., Spigarelli F., Tassinari M.* Regional development of circular economy in the European Union: A multidimensional analysis // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 255.
5. *Lavrikova Y., Buchinskaia O., Wegner-Kozlova E.* Greening of regional economic systems within the framework of sustainable development goals // Economy of Regions. 2021, vol. 17, no. 4, pp. 1110 – 1122. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-4-5.
6. *Порфирьев Б. Н.* «Зеленая» экономика: новые тенденции и направления развития мирового хозяйства // Научные труды ИНП РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ecfor.ru/pdf.php?id=books/sa2012/02.
7. *Лаврикова Ю. Г., Бучинская О. Н., Вегнер-Козлова Е. О.* Зеленый энергопереход российской промышленности: барьеры и пути преодоления // AlterEconomics. 2022, vol. 19, no. 4, pp. 638 – 662. DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-4.5.
8. *Ellen* MacArthur Foundation. Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. [Electronic resource]. URL: https//www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf (2013).
9. *Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J.* Circular economy: The concept and its limitations // Ecological Economics. 2018, no. 143, pp. 37 – 46.
10. *Валько Д. В.* Циркулярная экономика: основные бизнес-модели и экономические возможности // Журнал экономической теории. — 2020. — Т. 17. — № 1. — С. 156 – 163.
11. *Пахомова Н. В., Рихтер К. К., Ветрова М. А.* Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. — 2017. — Т. 33. — № 2. — С. 244 – 268. DOI: 10.21638/10.21638/11701/spbu05.2017.203.
12. *Kirchherr J., Reike D., Hekkert M.* Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // Resources, Conservation & Recycling. 2017, vol. 127, pp. 221 – 232.
13. *Вегнер-Козлова Е. О.* Принципы экономики замкнутого цикла / Национальные эколого-экономические и социальные интересы в эпоху больших вызовов: Материалы XVIII Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики. — Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2025. — С. 51 – 56. https://rio.ksc.ru/data/documents/55_ROEE_2025.pdf.
14. *Березиков С. А.* Проблемы и перспективы развития комплексного использования минерального сырья в контексте обеспечения устойчивого развития // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 6. URL: https://esj.today/PDF/67ECVN622.pdf.
15. *Ларичкин Ф. Д., Азим Иброхим, Глущенко Ю. Г., Переин В. Н., Алиева Т. Е.* Методика оценки эколого-экономической эффективности комплексного использования минерального сырья // Горный журнал. — 2011. — № 2. — С. 21 – 24.
16. *Алтушкин И. А., Левин В. В., Сизиков А. В., Король Ю. А.* Опыт освоения месторождений медно-порфирового типа на Урале // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 641 – 648. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641.
17. *Еремеева О. С., Мочалова Л. А., Подкорытов В. Н.* Государственные экономические инструменты стимулирования циркулярного недропользования // Известия УГГУ. — 2025. — № 1(77). — С. 162 – 170. DOI: 10.21440/2307-2091-2025-1-162-170.
18. *Яковлев В. Л.* О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России // Известия вузов. Горный журнал. — 2020. — № 7. — С. 5 – 20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.
19. *Хохряков А. В., Цейтлин Е. М., Студенок Г. А.* Подготовка специалистов-экологов нового поколения как важный элемент формирования конкурентных преимуществ отечественной минерально-сырьевой отрасли перед лицом глобальных вызовов настоящего и будущего // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2022. — № 1. — С. 112 – 126. DOI: 10.21440/0536-1038-2022-1-112-126.
20. *Гончар Н. В., Гуман О. М., Косинова И. И., Бударина В. А.* Оптимизация техногенно-минеральных образований при разработке медно-порфировых руд Томинского рудного поля Урала // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. — 2024. — № 1. — С. 89 – 101. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2024/1/89-101.

21. *Французов Б. В., Пустохина Н. Г., Соколов А. С., Стровский В. Е.* Экологические ограничения как инструмент механизма экологической безопасности природопользования // Известия УГГУ. — 2024. — № 4 (76). — С. 129—137. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-4-129-137. ГИАБ

REFERENCES

1. Ursul A. D. The formation of a sustainable civilization: new global goals. *Philosophy and Society*. 2016, no. 1, pp. 29—56. [In Russ].

2. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. Industry 4.0 and Industry 5.0 — Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*. 2021, vol. 61, pp. 530—535.

3. Kudelas D., Domru E., Stoianov A., Peters D. International experience, principles and conditions for the transition to a «green economy». *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 41, article 04023. DOI: 10.1051/e3sconf/20184104023], available at: https://www.researchgate.net/publication/325991139_International_Experience_Prin ciples_and_Conditions_for_the_Transition_to_a_Green_Economy.

4. Silvestri F., Spigarelli F., Tassinari M. Regional development of circular economy in the European Union: A multidimensional analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 255.

5. Lavrikova Y., Buchinskaia O., Wegner-Kozlova E. Greening of regional economic systems within the framework of sustainable development goals. *Economy of Regions*. 2021, vol. 17, no. 4, pp. 1110—1122. DOI: 10.17059/ekon.reg.2021-4-5.

6. Porfiriev B. N. «Green» economy: new trends and directions of development of the world economy. *Scientific works of INP RAS* [Electronic resource] [In Russ], available at: http://www.ecfor.ru/pdf.php?id=books/sa2012/02.

7. Lavrikova Yu. G., Buchinskaya O. N., Wegner-Kozlova E. O. Green energy transition of the Russian industry: barriers and ways to overcome. *AlterEconomics*. 2022, vol. 19, no. 4, pp. 638—662. [In Russ]. DOI: 10.31063/AlterEconomics/2022.19-4.5.

8. Ellen MacArthur Foundation. *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Electronic resource]. URL:https//www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf (2013).

9. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*. 2018, no. 143, pp. 37—46.

10. Valko D. V. Circular economy: basic business models and economic opportunities. *AlterEconomics*. 2020, vol. 17, no. 1, pp. 156—163. [In Russ]. DOI: 10.31063/2073-6517/2020.17-1.12.

11. Pakhomova N. V., Richter K. K., Vetrova M. A. The transition to a circular economy and closed supply chains as a factor of sustainable development. *St Petersburg University Journal of Economic Studies, SUJES*. 2017, vol. 33, no. 2, pp. 244—268. [In Russ]. DOI: 10.21638/10.21638/11701/spbu05.2017.203.

12. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*. 2017, vol. 127, pp. 221—232.

13. Wegner-Kozlova E. O. Principles of the circular economy. *Natsional'nye ekologo-ekonomicheskie i sotsial'nye interesy v epokhu bol'shikh vyzovov: Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Rossiyskogo obshchestva ekologicheskoy ekonomiki* [National ecological, economic and social interests in an era of great challenges: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference of the Russian Society of Ecological Economics], Apatity, 2025, pp. 51—56. [In Russ]. https://rio.ksc.ru/data/documents/55_ROEE_2025.pdf.

14. Berezikov S. A. Problems and prospects of the development of integrated use of mineral raw materials in the context of ensuring sustainable development. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022, vol. 14, no. 6. [In Russ]. URL: https://esj.today/PDF/67ECVN622.pdf.

15. Larichkin F. D., Ibrokhim Azim, Glushchenko Yu. G. [et al.] Methodology for assessing the ecological and economic efficiency of the integrated use of mineral raw materials. *Gornyi Zhurnal*. 2011, no. 2, pp. 21—24. [In Russ].

16. Altushkin I. A., Levin V. V., Sizikov A. V., Korol Y. A. Experience of development of porphyry copper type deposits in the Urals. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 641—648. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.641.

17. Eremeeva O. S., Mochalova L. A., Podkorytov V. N. State economic instruments for stimulating circular subsoil use. *News of the Ural State Mining University*. 2025, no. 1(77), pp. 162—170. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2025-1-162-170.

18. Yakovlev V. L. On the methodology of integrated development of reserves of solid mineral deposits for the development of a strategy for the development of the mineral resource base of Russia. *Minerals and Mining Engineering*. 2020, no. 7, pp. 5—20. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-5-20.

19. Khokhryakov A. V., Tseitlin E. M., Studenok G. A. Training of new generation environmental specialists as an important element in shaping the competitive advantages of the domestic mineral resources industry in the face of global challenges of the present and future. *Minerals and Mining Engineering*. 2022, no. 1, pp. 112—126. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1038-2022-1-112-126.

20. Gonchar N. V., Guman O. M., Kosinova I. I., Budarina V. A. Optimization of technogenic-mineral formations in the development of copper-porphyry ores of the Tominsky ore field of the Urals. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2024, no. 1, pp. 89—101. [In Russ]. DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2024/1/89-101.

21. Frenchov B. V., Pustokhina N. G., Sokolov A. S., Strovsky V. E. Environmental restrictions as a tool of the mechanism of environmental safety of nature management. *News of the Ural State Mining University*. 2024, no. 4 (76), pp. 129—137. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-4-129-137.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончар Наталия Валерьевна — канд. техн. наук, вице-президент
по экологической и промышленной безопасности,
Заслуженный эколог Российской Федерации,
АО «Русская медная компания», e-mail: gonchar_nataliya@rcc-group.ru,
ORCID ID: 0009-0002-0180-9592,
Вегнер-Козлова Екатерина Олеговна — канд. экон. наук,
доцент, старший научный сотрудник, Институт экономики УрО РАН,
e-mail: vegner.kozlova.eo@uiec.ru, ORCID ID: 0000-0003-4182-6514,
Researcher ID: N-5568-2016,
Антонова Ирина Александровна[1] — канд. геол-мин. наук,
главный специалист, e-mail: Dolinina_ira@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2749-1957,
Гуман Ольга Михайловна[1] — д-р геол.-минерал. наук,
директор, e-mail: guman2007@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7078-6916,
[1] ООО «Уралгеопроект».
Для контактов: Гуман О.М., e-mail: guman2007@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.V. Gonchar, Cand. Sci. (Eng.), Vice President for Environmental
and Industrial Safety, Honored Ecologist of the Russian Federation,
JSC «Russian Copper Company», 620075, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: gonchar_nataliya@rcc-group.ru, ORCID ID: 0009-0002-0180-9592,
E.O. Wegner-Kozlova, Cand. Sci. (Econ.), Assistant Professor,
Senior Researcher, Institute of Economics of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: vegner.kozlova.eo@uiec.ru, ORCID ID: 0000-0003-4182-6514,
Researcher ID: N-5568-2016,
I.A. Antonova[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Chief Specialist,
e-mail: Dolinina_ira@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-2749-1957,
O.M. Guman[1], Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Director,
e-mail: guman2007@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-7078-6916,
[1] «Uralgeoproekt» LLC, Ekaterinburg, Russia.
Corresponding author: O.M. Guman, e-mail: guman2007@mail.ru.

Получена редакцией 24.07.2025; получена после рецензии 10.10.2025; принята к печати 10.11.2025.
Received by the editors 24.07.2025; received after the review 10.10.2025; accepted for printing 10.11.2025.