

Научная статья

УДК 622.235

DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-157-168

## МАЙНИНГ 6.0 И ПОСТ-МАЙНИНГ

Жиронкин Сергей Александрович<sup>1</sup>, Коновалова Мария Евгеньевна<sup>2</sup>,  
Гасанов Эйваз Али оглы<sup>3</sup>, Абу-Абед Фарес Надимович<sup>4</sup>,  
Ху Тинтин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева<sup>2</sup> Самарский государственный экономический университет<sup>3</sup> Тихоокеанский государственный университет<sup>4</sup> Тверской государственный технический университет

\* для корреспонденции: zhironkinsa@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

10 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

22 июня 2025 г.

Принята к публикации:

30 июня 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

**Ключевые слова:**

пост-майнинг, Майнинг 6.0,  
природо-центричность,  
добыча полезных ископаемых,  
рециклинг.

**Аннотация.**

В статье рассмотрена роль цифровых технологий Индустрии 6.0 в развитии пост-майнинга – системы восстановления природной экосистемы, инфраструктуры и социально-экономической активности в кластерах интенсивной добычи твердых полезных ископаемых по окончании эксплуатации всего месторождения или его отдельных участков. Авторы выделили проблемы, сопровождающие затухание эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также риски, возникающие в связи с закрытием горнодобывающих предприятий, как предмет пост-майнинга. Также показано место пост-майнинга в производственном цикле современных горнодобывающих предприятий. Представлены цифровые технологии, образующие природо-центричную платформу Майнинга 6.0, раскрыта их преемственность с технологиями человеко-центричной Индустрии 5.0 и бизнес-центричной Индустрии 4.0 – когнитивные вычисления и интуитивные интерфейсы, визуально-языковые модели, облачный и генеративный искусственный интеллект, машинное видение и обучение, цифровые двойники, а также конвергентные биохимические технологии. Определены задачи и методы пост-майнинга, а также составляющие стратегии его реализации. Показаны пути внедрения технологий Майнинга 6.0 в системе пост-майнинга, включающие в себя анализ больших данных в области состояния поверхности, недр, водных и лесных ресурсов в горнодобывающем кластере, применение нейросетей и машинного обучения для сценарного моделирования комплекса мероприятий по ревитализации экосистемы и восстановлению социально-экономической активности, внедрению биохимических технологий рециклинга вторичного минерального сырья, инспектированию рекультивационных и ревитализационных процессов на основе блокчейн.

**Для цитирования:** Жиронкин С.А., Коновалова М.Е., Гасанов Э.А., Абу-Абед Ф.Н., Ху Тинтин. Майнинг 6.0 и пост-майнинг // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 4 (170). С. 157-168. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-157-168, EDN: NOYDLU

К настоящему моменту мировая горнодобывающая отрасль, пережившая период экстенсивного роста в 20 в. и ориентированная на ресурсоемкие технологии, создала многочисленные участки истощенных месторождений и районов, неблагоприятных с

экологической точки зрения. Основные экологические проблемы горнодобывающих районов проистекают из специфики современной геотехнологии, не позволяющей извлекать полезные компоненты без нарушения земельных, водных ресурсов, загрязнения воздуха и

сокращения биоразнообразия. Эти проблемы тесно связаны с использованием морально устаревших производственных процессов, значительной степенью износа основных фондов горнодобывающих предприятий, что суммируется в виде гигантских объемов подземных полостей, скопления громадных масс техногенных отходов (главным образом, отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ обогащательных фабрик), нарушения стабильности литосферы, а также повышенной опасности техногенных катастроф в кластерах интенсивной добычи твердых полезных ископаемых (горных ударов и землетрясений, эндогенных пожаров и пр.) [1]. В итоге развитие добычи твердых полезных ископаемых сегодня сопровождается рисками возникновения чрезвычайных ситуаций и катастроф, негативно влияющих на безопасность ведения горных работ и жизнедеятельность местных сообществ.

Комплексный процесс решения экологических и экономических проблем старопромышленных кластеров, занятых в добыче твердых полезных ископаемых, связывается с пост-майнингом как особым этапом развития горных работ, позволяющим не только частично восстановить и преобразовать ландшафт и биоразнообразие, но и обеспечить ускоренное социально-экономическое развитие горнодобывающих кластеров, подвергшихся глубокой депривации по мере затухания добычи и переработки сырья [2].

В таком определении пост-майнинг выходит

далеко за пределы рекультивации, поскольку затрагивает экономическую, а не только экологическую составляющую восстановления территорий с интенсивным развитием горных работ. Как отмечает Ю. Кречманн: «Добыча сырья есть конечный бизнес, который достигает своих пределов, когда месторождения истощаются или экономическая эффективность добычи ресурсов становится отрицательной в долгосрочном плане». Более того, по его мнению, добыча полезных ископаемых должна также измеряться и в масштабах человеческого времени, поскольку вмешательство в недра земли не позволяет вернуть поверхность в исходное состояние [3]. Поэтому логичным является понимание пост-майнинга как процесса продления «экономической жизни» территорий, на которых в течение длительного времени добываются полезные ископаемые, по мере закрытия добывающих предприятий, прежде всего за счет восстановления экосистемы, затем – при помощи мер и стимулов активизации деловой активности на принципиально новой основе, вне связи с эксплуатацией природных ресурсов [4].

Другое важное определение пост-майнинга раскрывает его как: «...комплекс новых знаний, получаемых на основе фундаментальных законов природы, необходимых для научного обоснования совокупности мероприятий по ликвидации горнодобывающего предприятия, восстановление свойств нарушенного горного массива и ландшафта ... с научно обоснованным

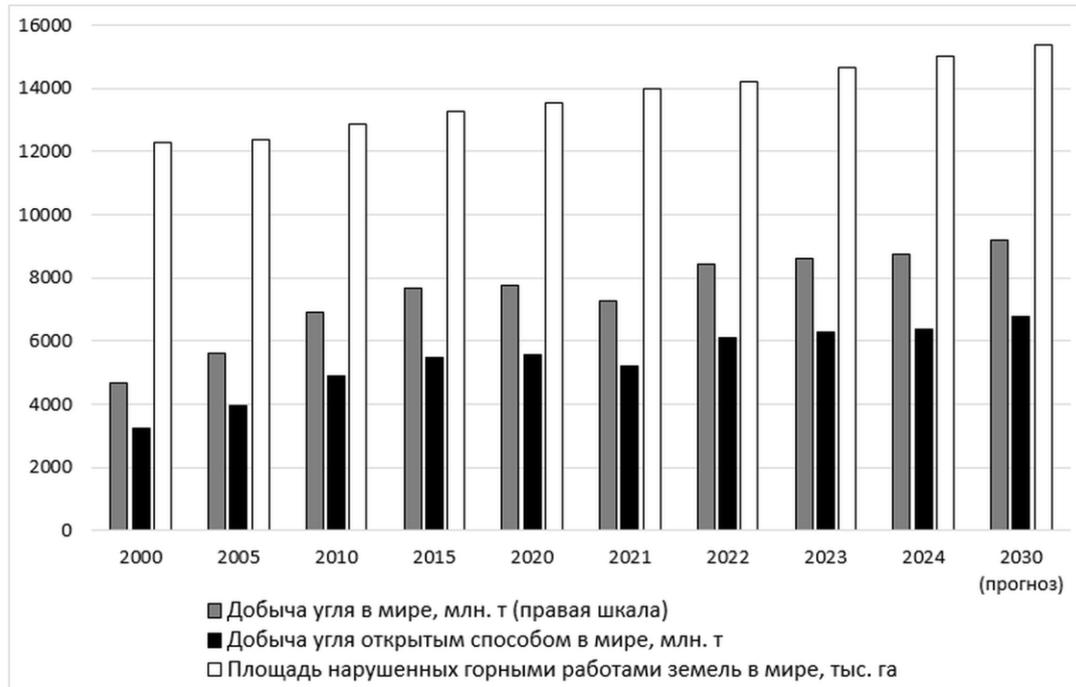


Рис. 1. Динамика добычи угля и нарушения земель в мире

Построено авторами по данным [6, 7]

Fig. 1. Dynamics of coal mining and land disturbance in the world

Drawn by the authors based on data from [6, 7]

предупреждением экологической опасности, ликвидацией последствий техногенного вторжения в геологическую среду ... что должно дополнять природные условия такими элементами, которые увеличивают ... продуктивность и ценность, отвечая современным и будущим потребностям населения [5].

Мы понимаем под пост-майнингом комплекс процессов, прямо связанных с восстановлением

природной экосистемы, инфраструктуры и социально-экономической активности в кластерах интенсивной добычи твердых полезных ископаемых по окончании эксплуатации всего месторождения или его отдельных участков.

Особую актуальность анализ возможностей и путей развития пост-майнинга приобретает для стран и регионов с зонами добычи угля высокой интенсивности. К примеру, добыча каждого

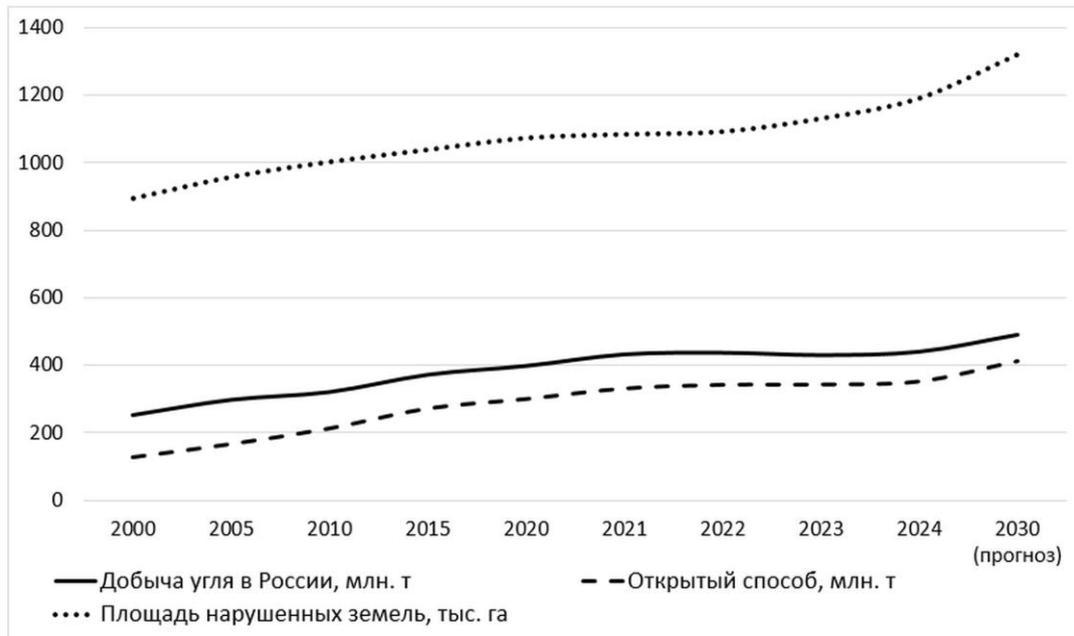


Рис. 2. Динамика площади нарушенных земель и добычи угля в России  
Построено авторами по данным [10–13].

Fig. 2. Dynamics of the area of disturbed lands and coal mining in Russia  
Drawn by the authors based on data from [10–13].

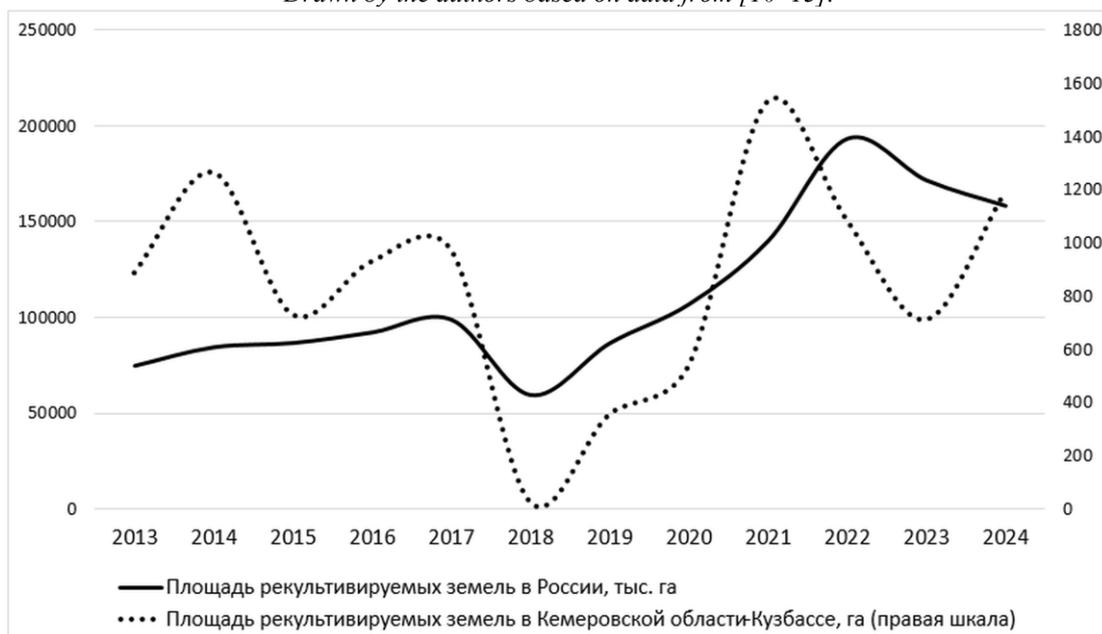


Рис. 3. Динамика площади рекультивируемых земель в России и Кемеровской области – Кузбассе  
Построено авторами по данным [14]

Fig. 3. Dynamics of the area of reclaimed lands in Russia and the Kemerovo region – Kuzbass  
Drawn by the authors based on data from [14]

миллиона тонн угля открытым способом нарушает от 2,6 до 43 гектаров поверхности, что делает пост-майнинг актуальным для России и ее основных угледобывающих регионов, где открытым способом добывается более 300 млн т угля [6].

В целом во всем мире за последние две с половиной десятилетия отмечается рост добычи угля – за 2000-2024 г. в 2 раза, с выходом открытой добычи на ведущие позиции (Рис. 1).

На Рис. 1 отчетливо видна тенденция роста открытой угледобычи – в 2,1 раза (до уровня 6,3 млрд т в год), что сопровождается ростом площади нарушенных земель, превысивший 1,5 млн га. Соответственно, прогнозы на 2030 г. также говорят об ожидаемом росте как мировой открытой добычи угля, так и площади непригодных для проживания и хозяйственной деятельности земель, вплотную к отметке 1,6 млн га.

Это подтверждается прогнозами сохранения или постепенного снижения существующих объемов выработки энергии при сжигании угля к 2050 г., формируемыми BP Energy Outlook и Bloomberg NEF New Energy Outlook [8, 9]:

- в сценарии «нулевых чистых выбросов» (Net Zero) – снижение объемов сжигания угля на ТЭЦ на 50% при сохранении интенсивности его использования в химической промышленности и металлургии на прежнем уровне (до 55% от мировой добычи);

- в инерционном сценарии – сохранение объемов добычи и сжигания энергетических углей на уровне 2022-2023 г. после роста до 2035 г.

Тем не менее, движение не только к заявленной углеродной нейтральности к 2050 г., но и к максимально возможному восстановлению земельных и водных ресурсов, нарушенных горными работами (в основном открытой добычей твердых полезных ископаемых), видится возможной благодаря роли цифровых технологий природо-центричной Индустрии 6.0 (которая, как ожидается, с 2050-х гг. сменит человеко-центричную Индустрию 5.0, которая, в свою очередь, уже сейчас сменяет цифровую платформу промышленности Индустрии 4.0).

Вместе с тем, к настоящему моменту в российской горнодобывающей промышленности

Таблица 1. Риски как предмет пост-майнинга

Table 1. Risks as a subject of post-mining

Группы	Риски	Способ ведения горных работ
Движение земной поверхности	Просадки	Подземный
	Карстовые воронки	
	Трещины	
	Обрушения и оползни на откосах	Открытый
	Оседание грунта под зданиями и сооружениями	Подземный / открытый
	Горные удары	
	Плывуны	
	Осыпи и обрушение	
Техногенные сейсмические явления		
Загрязнение воды и воздуха	Загрязнение наземных водных ресурсов	Открытый
	Загрязнение подземных водных ресурсов	Подземный
	Техногенный водоприток	Подземный
	Нарушение потоков подземных вод, депрессионные воронки	Подземный / открытый
	Загрязнение воздуха	
	Радиоактивное загрязнение	
Пожароопасность	Эндогенные пожары в угольных шахтах	Подземный
	Утечки метана в подвалы зданий	Подземный
	Возгорание складов угля	Подземный / открытый

Построено авторами по данным [15]

Drawn by the authors based on data from [15]

отмечается как рост добычи угля, на ведущее место в котором вышел открытый способ, так и площадь нарушенных земель (Рис. 3).

Как следует из данных, представленных на Рис. 2, несмотря на то, что с 2020 г. рост угледобычи замедлился (по сравнению с темпами 2000-2015 гг.), рост площади нарушенных земель сохранился практически на прежнем уровне, и к 2030 г. прогнозируется его ускорение.

В свою очередь, темпы рекультивации нарушенных земель в России отличаются нестабильностью (Рис. 3).

Как следует из Рис. 3, после роста в 2019-2022 гг. отмечается сокращение темпов рекультивации в России. При этом в Кузбассе, сосредотачивающем более половины добычи угля в стране, объемы рекультивации составляют порядка 1% от общероссийских, что ясно свидетельствует о назревшей потребности перехода к пост-майнингу как форме восстановления экологической и социально-экономической системы региона со сверхинтенсивной добычей полезных ископаемых.

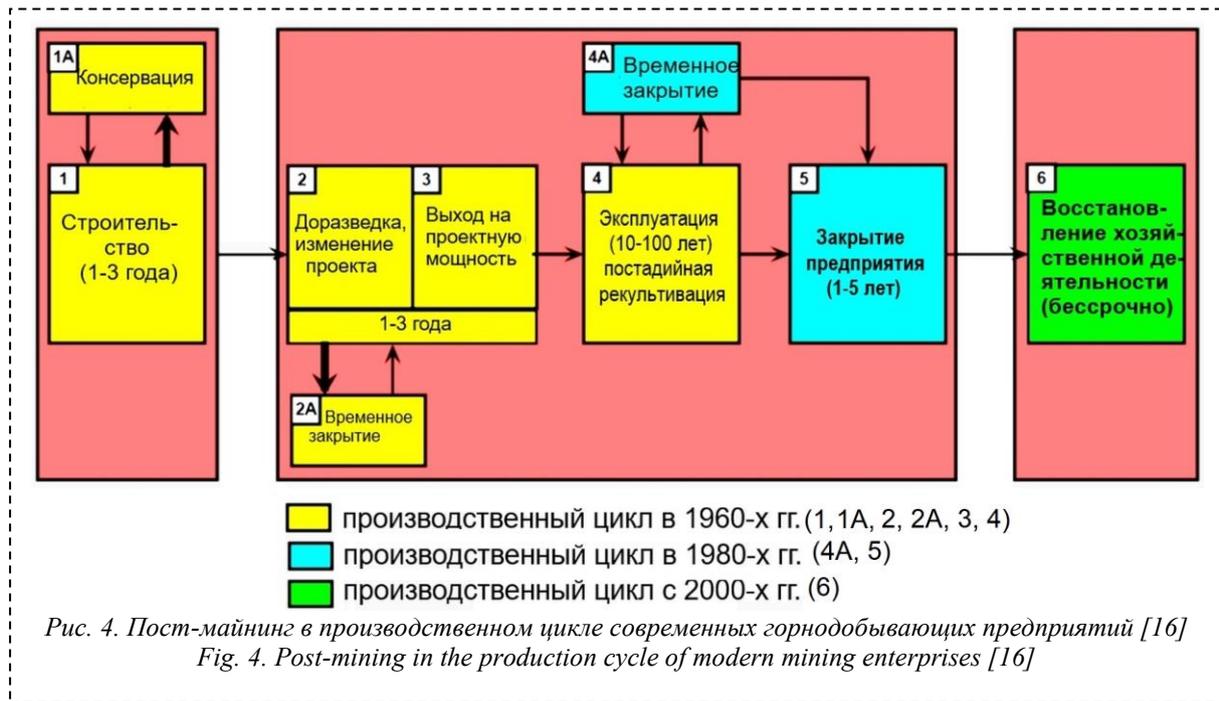
Затухание эксплуатации месторождений в кластерах с высокой концентрацией угледобычи значительно усиливает весь спектр соответствующих рисков, минимизация которых является основной задачей пост-майнинга (Таблица 1).

Как следует из Таблицы 1, значительная часть рисков, связанных с закрытием горнодобывающих предприятий, сохраняется в течение длительного времени, препятствуя восстановлению хозяйственной и социально-экономической деятельности в сырьевом

кластере по завершению эксплуатации значительной части месторождений. Для уменьшения вероятности и масштаба реализации данных рисков необходимо удлинение жизненного цикла горнодобывающих предприятий на этап, соответствующий пост-майнингу, по завершению добычных работ и проектной рекультивации (Рис. 4).

Несмотря на то, что сам по себе пост-майнинг фигурирует в исследованиях процессов рекультивации уже достаточно давно, технологическую платформу его будущего развития мы ассоциируем с Майнингом 6.0 – отраслевым «срезом» Индустрии 6.0, ожидаемой во второй половине 21 в. Для нее характерна природо-центричность передовых производственных технологий, которая должна сменить человеко-центричность технологий Индустрии 5.0, интенсивно распространяющихся в мире как новый виток развития цифровых технологий Индустрии 4.0 (искусственный интеллект и нейросети, машинное зрение и обучение, аналитика Больших Данных, облачные вычисления, блокчейн и пр.).

Технологии Индустрии 5.0 ориентированы на взаимодействие между людьми и машинами, что означает применительно к Майнингу 5.0 ускоренное создание безопасной среды горячего труда в условиях быстрого роста производительности труда (в основном за счет повышения удельной мощности оборудования, повышения бесперебойности его работы и оптимизации загрузки). Также Майнинг 5.0 означает повышение устойчивости и адаптивности отдельных предприятий и отраслевых производственных комплексов, как применительно к технологическим сбоям,



природным и техногенным катаклизмам, так и к шокам мирового рынка сырья, сокращающим спрос на полезные ископаемые и инвестиции в их добычу [2].

Передовые производственные технологии Индустрии 5.0, образующие платформу Майнинг 5.0, включают в себя коллаборативных роботов, не только выполняющих рутинную работу человека, но и занятых в проектировании и управлении производством, оставляя горнякам простор для инженерного творчества, цифровые двойники оборудования, отдельных процессов и целых предприятий, позволяющие наглядно визуализировать любые изменения в деятельности предприятий, выводя их на уровень индикаторов, значимых для топ-менеджмента и собственников (расходы и прибыль, курсы акций, потребность в дополнительных инвестициях). Также к цифровым технологиям, характерным для Майнинга 5.0, относится промышленный Интернет вещей как сетевая инфраструктура, связывающая людей, машин и недр [2].

Несмотря на очевидные преимущества для занятых в горнодобывающей промышленности, которые несет в себе Майнинг 5.0, его роль в развитии пост-майнинга видится нам достаточно ограниченной, поскольку изначально ориентирована на потребности человека, а не на сохранение окружающей среды.

Напротив, Индустрия 6.0 означает постановку во главу угла достижение экологических, а не технологических (Индустрия 4.0) и общественных (Индустрия 5.0) целей. При этом ее платформа в горнодобывающей отрасли (Майнинг 6.0) подразумевает дальнейшее движение по пути прогресса в цифровых технологиях управления производственными системами без участия человека, включая программирование и проектирование. Специфичные для Индустрии 6.0 технологии включают в себя когнитивные вычисления и интуитивные интерфейсы, визуально-языковые модели, облачный и генеративный искусственный интеллект [17].

Применительно к Майнингу 6.0 данные технологии позволят продвинуться в развитии экологически дружелюбных практик во всех процессах добычи и первичной переработки твердых полезных ископаемых. Это означает преемственность цифровых технологий, применяемых в горнодобывающем секторе, при переходе от Индустрии 4.0 (цифровые производственные системы) к Индустрии 5.0 (кибер-физические системы – беспилотное оборудование и «умные предприятия») и далее – к Индустрии 6.0 (природо-сберегающие цифровые технологии, изначальное проектирование оборудования и геотехнологии с учетом снижения экологического ущерба),

основанные на технологической конвергенции для передачи успешных практик из глубоко цифровизированных отраслей в другие. Это можно рассматривать как синергию искусственного интеллекта и машинного обучения, соединения человеческого и машинного творчества, перехода от цифровых двойников отдельных процессов к цифровым тройникам целых предприятий, что рассматривается в качестве парадигмы Майнинга 6.0, с характерным радикально более высоким уровнем оптимизации использования земельных, водных ресурсов при добыче и переработке полезных ископаемых.

На этом основании развитие пост-майнинга за счет импульса, вызываемого технологиями Майнинга 6.0, придает оптимизма перспективам «бесшовного» Четвертого энергетического перехода, который рассматривается в контексте достижения экологических и климатических Целей Устойчивого Развития ООН без сокращения доступа различных стран к энергии в будущем.

Глобальной значимостью развития пост-майнинга объясняется интерес многих государств к его законодательному и организационному регулированию [18]. В частности, вопросами пост-развития горнодобывающих регионов в Европе занимаются специально созданные для этого структуры: Post – mining Alliance и European Association for Coal and Lignite «Euracoal», в США – National Mining Association [19].

Методологические основы пост-майнинга включают в себя цели и задачи, основные методы (в т. ч. продиктованные цифровыми технологиями Майнинга 6.0), а также стратегии, реализуемые предприятиями и государством [20–22].

Задачи пост-майнинга включают в себя:

- геомониторинг, включающий регулярный контроль состояния разрабатываемых участков недр, земной поверхности, изменений в состоянии воздуха, воды, биосферы;

- ревитализацию нарушенных земель, восстановление природных водных ресурсов, лесовосстановление;

- конечный рециклинг – развитие новых видов бизнеса в повторном использовании вторичных ресурсов;

- социальную переадаптацию населения прилегающих к шахтам населенных пунктов (переподготовка кадров, создание новых рабочих мест);

- финансовое обеспечение – создание специализированных финансовых фондов за счет экологического страхования, взносов государства и предприятий.

К методам пост-майнинга можно отнести следующие:

Таблица 2. Составляющие стратегии пост-майнинга кластера интенсивной добычи полезных ископаемых

Table 2. Components of the post-mining strategy of an intensive mining cluster

Составляющие стратегии	Объект	Содержание
«Недеяние»	Все месторождение кластера	«Нулевое действие» – восстановление за счет медленно развивающихся естественных процессов
Ликвидация критически негативных последствий	Рельеф, водные ресурсы, недра	Физическая, химическая и биологическая очистка почвы и воды
Ревитализация и фитостабилизация	Биосфера	Возвращение экосистемы в прежнее состояние
Рекультивация	Рельеф, почвы, лесной покров	Формирование новой биосферы, во многом аналогичной предыдущей
Технологическая реабилитация	Почвы, лесной покров, экономика	Внедрение новых видов землепользования, которые поддерживают устойчивое развитие биосферы и экономики
Социально-экономическая реабилитация	Экономика	Разработка альтернативных вариантов использования существующей инфраструктуры
Совместное использование	Вся территория кластера	Сосуществование горнодобывающих предприятий с другими видами деятельности в участках кластера, в которых больше не ведутся горные работы

1. Полевые исследования и лабораторный анализ, геомоделирование и прототипирование.

2. Управление геоданными, в т. ч. за счет повсеместного применения беспилотных летательных аппаратов для наблюдения за поверхностью Земли и маркшейдерской съемки восстанавливаемых участков.

3. Интегрированное управление проектами восстановления земельных и водных ресурсов, репрофилирование и развитие социально-экономической деятельности.

4. Связи с общественностью и научно-общественное обсуждение экологических проблем кластеров интенсивной добычи полезных ископаемых, выдвижение законодательных инициатив, разработка региональных стратегий ревитализации.

В свою очередь, стратегия пост-майнинга может включать в себя следующие элементы (Таблица 2) [23].

Как следует из Таблицы 2, в системе пост-майнинга ключевое значение приобретает воссоздание либо модификация биоразнообразия экосистемы и стимулирование социально-экономической активности на территориях кластера интенсивной добычи полезных ископаемых после закрытия горнодобывающих предприятий.

Внедрение в эти процессы технологий Майнинга 6.0 позволит интегрировать геотехнические методы традиционной рекультивации и новые технологии микробиологии, биохимии, а также методов экологической и социально-экономической инженерии для комплексной ревитализации добывающих кластеров для реструктуризации экономики.

Генеративный искусственный интеллект позволяет обеспечить глубокий интегрированный анализ спутниковых снимков, данных геологоразведки, проб почвы и воздуха. Благодаря внедрению нейронных сетей образуется возможность создавать проекты ревитализации и восстановления социально-экономической активности с высокой эффективностью восстановления растительности и водных бассейнов, изменение ландшафта для создания рекреационно-туристских комплексов, в т. ч. заводнения заброшенных карьерных полей для формирования водохранилищ и искусственных прудов. На нейросетях строятся модели глубокого обучения, используемые для диагностики изменений в техногенных массивах и экосистеме в добывающих кластерах, незаменимые для анализа многочисленных факторов влияния накопленной за весь период эксплуатации месторождений антропогенной нагрузки на окружающую среду.

В свою очередь, технологии распределенных вычислений (блокчейн) позволят обеспечить беспристрастный контроль и мониторинг процессов восстановления ландшафта, экосистемы, экономической деятельности в кластерах добычи полезных ископаемых – как со стороны государства, так и со стороны общества в целом.

Для восстановления биоразнообразия на территориях, ранее занятых в интенсивной добыче полезных ископаемых, необходимы конвергентные технологии Майнинга 6.0, связанные с интеграцией достижений биохимии и микробиологии для подбора высокоэффективных биохимических композиций, способных быстро адаптироваться к

экстремальным условиям, характерным для терриконов и отвалов, водоемов техногенного происхождения, а также для оптимизации использования минеральных удобрений и органических добавок для стимуляции роста растений.

Использование алгоритмов машинного обучения позволит точно спрогнозировать изменение характеристик местности в ходе ревитализации и подобрать наиболее подходящие типы растений в совокупности с первичной фауной, позволяя продуктивно реконструировать пространство.

Европейский опыт пост-майнинга демонстрирует успешное применение нейросетей, машинного видения и обучения для разработки альтернативных схем проектирования землепользования на рекультивированных участках с привлечением цифровых инструментов визуализации и анализа (программа («Transition to Revitalization of Industrial Mining Areas» – TRIM4PostMining). Она представляет собой международную инициативу, направленную на комплексное решение вопросов восстановления и модернизации старых горнопромышленных районов за счет создания устойчивых социальных, экономических и экологических условий высококачественной жизни местных сообществ в восстановленной или обновленной окружающей среде [24].

Восстановление экономической активности в системе пост-майнинга требует использования того потенциала добычи полезных ископаемых, который несет в себе рециклинг отходов горнодобывающей промышленности – вторичное извлечение ценных компонентов из отвалов вскрышных пород, содержащих и полезные компоненты с некондиционной концентрацией. Пригодные для этой цели технологии Майнинга 6.0 также являются конвергентными и объединяют процессы химии, генетики и микробиологии. В частности, отмечается успех в биохимическом извлечении из вторичных залежей при применении следующих технологий [25]:

- биоокисление сернистого железа (пирит) с применением генно-модифицированных бактерий-хемолитотрофов, приспособленных к кислой среде обитания;

- использование культур железовосстанавливающих бактерий, выделяющих также элементы, сопутствующие железу в первичных залежах – востребованные марганец, магний, а также высокоценные титан, хром, никель;

- биосорбция тяжелых металлов из шахтных вод, используемая в глубокой очистке водных ресурсов, длительное время загрязняемых горнодобывающими предприятиями.

Таким образом, развитие пост-майнинга на основе человекоцентричных и конвергентных технологий Индустрии 6.0 и ее платформы в горнодобывающем секторе – Майнинга 5.0 – позволит создать условия для перехода к природо-ориентированным принципам добычи полезных ископаемых – полного восстановления экологической и социально-экономической систем старопромышленных районов по окончании эксплуатации месторождений, а также проектирования новых добывающих предприятий со всемерным учетом запроса общества на экологическую безопасность. Будущее горнодобывающей промышленности во второй половине 21 в. неотрывно связано с соединением инновационных цифровых, биохимических технологий Майнинга 6.0, экологической и социальной ответственности. Развитие пост-майнинга на платформе Майнинг 6.0 представляет собой радикальное изменение существующей парадигмы развития горнодобывающей отрасли, с переключением внимания от технического и биологического восстановления поверхности в зоне интенсивных горных работ к интегрированному восстановлению природы, экономической и социальной активности. Такая трансформация открывает перспективы для значительного сокращения не только экологического, но и социально-экономического ущерба территории горнодобывающих кластеров с горизонтом в несколько десятилетий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесникова Л. А., Ковальчук Т. В. Проблемы и перспективы экологической безопасности горнодобывающих регионов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 2-1. С. 275–286.
2. Абу-Абед Ф. Н. Применение технологий интеллектуального управления и бизнес-проектирования Индустрии 5.0 в Майнинге 5.0 // Экономика и управление инновациями. 2022. № 3. С. 50–59.
3. Kretschmann J., Goerke-Mallet P., Dauber C., Hegemann M. Post-mining for a better future: The development of the research centre of post-mining at the TH Georg Agricola University / Proceedings of the 32nd SOMP Annual Meeting and Conference 2022 Windhoek Country Club & Resort, 8-24 September 2022, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Pp. 177–186.
4. Kretschmann J., Efremenkov A. B., Khoreshok A. A. From Mining to Post-Mining: The Sustainable Development Strategy of the German Hard Coal Mining Industry // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 50. Pp. 012024.
5. Шубин А. А. Задачи постмайнинга в период активизации техногенных процессов // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2006. № 3. С. 115–117.

6. Плаkitкина Л. С., Плаkitкин Ю. А., Дьяченко К. И. Современные тренды и прогноз развития угольной промышленности мира и России в условиях трансформации мировой экономики // Уголь. 2024. № 3. С. 44–51.

7. Финмаркет. Добыча угля в РФ в 2024 году выросла на 1,3%. URL: <https://www.finmarket.ru/news/6333176> (последнее обращение: 27.05.2025).

8. British Petroleum. Energy Outlook 2024. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (последнее обращение: 27.05.2025).

9. Bloomberg NEF. New Energy Outlook 2025. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/new-energy-outlook/> (последнее обращение: 27.05.2025).

10. Мешков Г. Б., Петренко И. Е., Губанов Д. А. Итоги работы угольной промышленности России за 2023 год // Уголь. 2024. № 3. С. 18–29.

11. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/pochva-i-zemelnye-resursy/vozdeystvie-na-pochvy-i-zemelnye-resursy/> (последнее обращение: 27.05.2025).

12. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году». URL: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru> (последнее обращение: 27.05.2025).

13. Информационно-правовой портал «Гарант.ру». Информация Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 10 сентября 2024 г. «Минприроды России подготовило проект ежегодного Госдоклада о состоянии и охране окружающей среды». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409549645/> (последнее обращение: 27.05.2025).

14. ЕМИС. Государственная статистика. Площадь рекультивированных земель. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/44519?> (последнее обращение: 27.05.2025).

15. Al Heib M., Degas M., Lecomte A., Franck C. Post-Mining Risk Management and multi-hazard approaches, methodology and application // MATEC

Web of Conferences. 2024. Vol. 389. Pp. 00084.

16. Hodge R.A., Killam R. Post Mining Regeneration Best Practice Review: North American Perspective. 2003. URL: [https://anthonyhodge.ca/publications/Post\\_Mining\\_Regeneration.pdf](https://anthonyhodge.ca/publications/Post_Mining_Regeneration.pdf) (последнее обращение: 27.05.2025).

17. Бабкин А.В., Шкарупета Е.В. Индустрия 6.0: сущность, тенденции и стратегические возможности для России // Экономика промышленности. 2024. № 17(4). С. 353–377.

18. Zhironkin S., Ezdina N. Review of Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0 Innovative Technologies // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Pp. 4917.

19. Пивняк Г. Г., Шашенко А. Н., Пилов П. И., Пашкевич М. С. Post mining: технологический аспект решения проблемы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. № 1. С. 38–46.

20. Шубин А. А. Задачи постмайнинга в период активизации техногенных процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 3. С. 86–98.

21. Кречманн Ю., Плиен М., Нгуен Т. Х. Н., Рудаков М. Л. Эффективное наращивание потенциала в горном деле за счет обучения, расширяющего возможности в области управления охраной труда // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 248–256.

22. Кречманн Ю. Эффективное управление земельными ресурсами: на примере Рурской области // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 1(101). С. 127–132.

23. Pagouni C., Pavloudakis F., Kapageridis I., Yiannakou A. Transitional and Post-Mining Land Uses: A Global Review of Regulatory Frameworks, Decision-Making Criteria, and Methods // Land. 2024. Vol. 13. Pp. 1051.

24. Benndorf J., Restrepo D.A., Merkel N., John A., Buxton M., Guatame-Garcia A., Dalm M., de Waard B., Flores H., Möllerherm S. TRIM4Post-Mining: Transition Information Modelling for Attractive Post-Mining Landscapes – A Conceptual Framework // Mining. 2022. Vol. 2. Pp. 248–277.

25. Aytar P., Kay C. M., Mutlu M. B., Cabuk A. Coal Desulfurization with Acidithiobacillus ferrivorans from Balya Acidic Mine Drainage // Energy Fuels. 2013. 27. № 6. Pp. 3090–3098.

© 2025 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

**Жиронкин Сергей Александрович**, доктор экон. наук, профессор, e-mail: [zhironkinsa@kuzstu.ru](mailto:zhironkinsa@kuzstu.ru)  
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,

г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

**Коновалова Мария Евгеньевна**, доктор экон. наук, профессор, e-mail: [ecun@sseu.ru](mailto:ecun@sseu.ru)

Самарский государственный экономический университет, 443090, Россия, г. Самара, ул. Советской Армии, 141

**Гасанов Эйваз Али оглы**, доктор экон. наук, доцент, e-mail: [Eyvaz\\_Gasanov@mail.ru](mailto:Eyvaz_Gasanov@mail.ru)

Тихоокеанский государственный университет, 680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136

**Абу-Абед Фарес Надимович**, кандидат технических наук, доцент, e-mail: [aafares@tstu.tver.ru](mailto:aafares@tstu.tver.ru)

Тверской государственный технический университет, 170026 г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22

**Ху Тинтин**, аспирант, e-mail: [hutingting@kuzstu.ru](mailto:hutingting@kuzstu.ru)

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

*Заявленный вклад авторов:*

Жиронкин Сергей Александрович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, работа с редакцией.

Коновалова Мария Евгеньевна – обзор существующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста.

Гасанов Эйваз Али оглы – научный менеджмент, написание текста.

Абу-Абед Фарес Надимович – сбор и анализ данных, оформление статьи по требованиям.

Ху Тинтин – сбор и анализ данных, оформление статьи по требованиям.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### MINING 6.0 AND POST-MINING

Sergey A. Zhironkin<sup>1</sup>, Maria E. Konovalova<sup>2</sup>,  
Eyvaz A. Gasanov<sup>3</sup>, Fares N. Abu-Abed<sup>4</sup>,  
Hu Tingting<sup>1</sup>

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

<sup>2</sup> Samara State Economic University

<sup>3</sup> Pacific National University

<sup>4</sup> Tver State Technical University

\* for correspondence: [zhironkinsa@kuzstu.ru](mailto:zhironkinsa@kuzstu.ru)



#### Article info

Received:

10 April 2025

Accepted for publication:

22 June 2025

Accepted:

30 June 2025

Published:

28 August 2025

**Keywords:** post-mining, Mining 6.0, nature-centric, mining, recycling

#### Abstract.

*The article examines the role of digital technologies of Industry 6.0 in the development of post-mining – a system for restoring the natural ecosystem, infrastructure and socio-and-economic activity in clusters of intensive extraction of solid minerals upon completion of the operation of the entire deposit or its individual sections. The authors identified the problems accompanying the fading of the exploitation of mineral deposits, as well as the risks arising from the closure of mining enterprises, as the subject of post-mining. The place of post-mining in the production cycle of modern mining enterprises is also shown. The digital technologies that form the nature-centric platform of Mining 6.0 are presented, their continuity with the technologies of human-centric Industry 5.0 and business-centric Industry 4.0 is revealed – cognitive computing and intuitive interfaces, visual-language models, cloud and generative artificial intelligence, machine vision and learning, digital twins, as well as convergent biochemical technologies. The tasks and methods of post-mining, as well as the components of the strategy for its implementation, are defined. The paper shows the ways of implementing Mining 6.0 technologies in the post-mining system, including the analysis of big data in the field of the state of the surface, subsoil, water and forest resources in the mining cluster, the use of neural networks and machine learning for scenario modeling of a set of measures for ecosystem revitalization and restoration of socio-economic activity, the introduction of*

*biochemical technologies for recycling secondary mineral raw materials, inspection of reclamation and revitalization processes based on blockchain.*

**For citation:** Zhironkin S.A., Konovalova M.E., Gasanov E.A., Abu-Abed F.N., Hu Tingting. Mining 6.0 and post-mining. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2025; 4(170):157-168. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-157-168, EDN: NOYDLU

## REFERENCES

1. Kolesnikova L.A., Koval'chuk T.V. Problemy i perspektivy jekologicheskoy bez-opasnosti gornodobyvayushhih regionov. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2021; 2-1:275–286.
2. Abu-Abed F.N. Primenenie tehnologij intellektual'nogo upravleniya i biznes-proektirovaniya Industrii 5.0 v Majninge 5.0. *Jekonomika i upravlenie innovacijami*. 2022; 3:50–59.
3. Kretschmann J., Goerke-Mallet P., Dauber C., Hegemann M. Post-mining for a better fu-ture: The development of the research centre of post-mining at the TH Georg Agricola University. *Proceedings of the 32nd SOMP Annual Meeting and Conference 2022 Windhoek Country Club & Resort, 8-24 September 2022, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Pp. 177–186.
4. Kretschmann J., Efremenkov A.B., Khoreshok A.A. From Mining to Post-Mining: The Sustainable Development Strategy of the German Hard Coal Mining Industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 50:012024.
5. Shubin A.A. Zadachi postmajninga v period aktivizacii tehnogennyh processov // *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2006; 3:115–117.
6. Plakitkina L.S., Plakitkin Ju.A., D'jachenko K.I. Sovremennye trendy i prognoz razvitija ugol'noj promyshlennosti mira i Rossii v usloviyah transformacii mirovoj jekonomiki. *Ugol'*. 2024; 3:44–51.
7. Finmarket. Dobycha uglja v RF v 2024 godu vyrosla na 1,3%. URL: <https://www.finmarket.ru/news/6333176> (last access: 27.05.2025).
8. British Petroleum. Energy Outlook 2024. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html> (last access: 27.05.2025).
9. Bloomberg NEF. New Energy Outlook 2025. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/new-energy-outlook/> (last access: 27.05.2025).
10. Meshkov G.B., Petrenko I.E., Gubanov D.A. Itogi raboty ugol'noj promyshlennosti Rossii za 2023 god. *Ugol'*. 2024; 3:18–29.
11. Ministerstvo prirodnih resursov i jekologii RF. Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2017 godu». URL: <https://gosdoklad-ecology.ru/2017/pochva-i-zemelnye-resursy/vozdeystvie-na-pochvy-i-zemelnye-resursy/> (last access: 27.05.2025).
12. Ministerstvo prirodnih resursov i jekologii RF. Gosudarstvennyj doklad «O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2020 godu». URL: <https://2020.ecology-gosdoklad.ru> (last access: 27.05.2025).
13. Informacionno-pravovoj portal «Garant.ru». Informacija Ministerstva pri-rodnyh resursov i jekologii Rossijskoj Federacii ot 10 sentjabrja 2024 g. «Minprirody Rossii podgotovilo proekt ezhegodnogo Gosdoklada o sostojanii i ohrane okruzhajushhej sredy». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/409549645/> (last access: 27.05.2025).
14. EMIS. Gosudarstvennaja statistika. Ploshhad' rekultivirovannyh zemel'. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/44519?> (last access: 27.05.2025).
15. Al Heib M., Degas M., Lecomte A., Franck C. Post-Mining Risk Management and multi-hazard approaches, methodology and application. *MATEC Web of Conferences*. 2024; 389:00084.
16. Hodge R.A., Killam R. Post Mining Regeneration Best Practice Review: North American Perspective. 2003. URL: [https://anthonyhodge.ca/publications/Post\\_Mining\\_Regeneration.pdf](https://anthonyhodge.ca/publications/Post_Mining_Regeneration.pdf) (last access: 27.05.2025).
17. Babkin A.V., Shkarupeta E.V. Industrija 6.0: sushhnost', tendencii i strategiche-skie vozmozhnosti dlja Rossii. *Jekonomika promyshlennosti*. 2024; 17(4):353–377.
18. Zhironkin S., Ezdina N. Review of Transition from Mining 4.0 to Mining 5.0 Innovative Technologies. *Applied Sciences*. 2023; 13:4917.
19. Pivnjak G. G., Shashenko A. N., Pilov P. I., Pashkevich M. S. Post mining: tehnolo-gicheskij aspekt reshenija problem. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*. 2012; 1:38–46.
20. Shubin A.A. Zadachi postmajninga v period aktivizacii tehnogennyh processov. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2006; 3:86–98.
21. Krechmann Ju., Plien M., Nguen T.H.N., Rudakov M.L. Jeffektivnoe narashhivanie potenciala v gornom dele za schet obuchenija, rasshirjajushhego vozmozhnosti v oblasti upravleniya ohranoj truda. *Zapiski Gornogo instituta*. 2020; 242:248–256.
22. Krechman Ju. Jeffektivnoe upravlenie zemelnymi resursami: na primere Rurskoj oblasti. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2014; 1(101):127–132.
23. Pagouni C., Pavloudakis F., Kapageridis I., Yiannakou A. Transitional and Post-Mining Land Uses:

A Global Review of Regulatory Frameworks, Decision-Making Criteria, and Methods. *Land*. 2024; 13:1051.

24. Benndorf J., Restrepo D.A., Merkel N., John A., Buxton M., Guatame-Garcia A., Dalm M., de Waard B., Flores H., Möllerherm S. TRIM4 Post-Mining: Transition Information Model-ing for Attractive Post-

Mining Landscapes A Conceptual Framework. *Mining*. 2022; 2:248–277.

25. Aytar P., Kay C.M., Mutlu M.B., Cabuk A. Coal Desulfurization with *Acidithiobacillus ferrivorans* from Balya Acidic Mine Drainage. *Energy Fuels*. 2013; 27(6):3090–3098.

© 2025 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*The authors declare no conflict of interest.*

*About the authors:*

**Sergey A. Zhironkin**, Doctor of Economics, Professor, e-mail: zhironkinsa@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennya st., 28

**Maria E. Konovalova**, Doctor of Economics. Sciences, Professor, e-mail: ecun@sseu.ru

Samara State Economic University, 443090, Russia, Samara, Krasnoy Armii st., 141

**Eyvaz A. Gasanov**, Doctor of Economics, Associate Professor, e-mail: Eyvaz\_Gasanov@mail.ru

Pacific National University, 680035, Khabarovsk, Tikhookeanskaya St., 136

**Fares N. Abu-Abed**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: aafares@tstu.tver.ru

Tver State Technical University, 170026, Tver, Afanasy Nikitin Embankment, 22

**Hu Tintin**, Post-Graduate, e-mail: hutinting@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennya st., 28

*Contribution of the authors:*

Sergey A. Zhironkin – review of existing literature, formulation of a research task, scientific management, working with the editorial board.

Maria E. Konovalova – review of existing literature, data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

Eyvaz A. Gasanov – scientific management, writing the text.

Fares N. Abu-Abed – data collection and analysis, article design according to requirements.

Hu Tintin – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

