

Научная статья

УДК 622.235

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-176-186

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТ-МАЙНИНГА 4.0

Жиронкин Сергей Александрович<sup>1</sup>, Жиронкина Ольга Валерьевна<sup>2</sup>,  
Коновалова Мария Евгеньевна<sup>3</sup>, Кудреватых Андрей Валерьевич<sup>4</sup><sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева<sup>2</sup> Кемеровский государственный университет<sup>3</sup> Самарский государственный экономический университет

\* для корреспонденции: zhironkinsa@kuzstu.ru

**Информация о статье**

Поступила:

18 января 2026 г..

Одобрена после

рецензирования:

31 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

**Ключевые слова:**пост-майнинг 4.0, Индустрия  
4.0, цифровой двойник,  
Интернет вещей,  
искусственный интеллект,  
рекультивация**Аннотация.**

В статье представлена концепция эволюции подходов к рекультивации нарушенных горными работами сырьевых кластеров, включающая пост-майнинг 1.0 (механическая ликвидация последствий), пост-майнинг 2.0 (биоцентрический и нормативный под-ход), пост-майнинг 3.0 (технологический мониторинг) и пост-майнинг 4.0 (киберфизические системы и управление жизненным циклом территории). Цель статьи – систематизировать и проанализировать применение цифровых технологий для комплексно-го управления жизненным циклом объектов пост-майнинга. Гипотеза исследования: каждый новый этап «пост-майнинга» расширяет его временные рамки (от ликвидации последствий к управлению полным жизненным циклом), пространственный охват (от участка к экосистеме и территории) и трансформирует экономическую сущность процесса (от затрат к инвестициям). Показано, что переход к каждой новой стадии не от-меняет предыдущие, а надстраивается над ними, повышая сложность, превентивность и экономическую эффективность. Особое внимание уделено технологиям четвертого этапа: цифровым двойникам, Интернету вещей, искусственному интеллекту и предиктивной аналитике, которые трансформируют пост-майнинг в источник данных и новых бизнес-моделей для устойчивого развития горнодобывающих территорий. Доказано, что интеграция данных технологий позволяет перейти от разовых мероприятий по ликвидации последствий к созданию долгосрочных, устойчивых экосистем и новых экономических моделей ревитализации.

**Для цитирования:** Жиронкин С.А., Жиронкина О.В., Коновалова М.Е., Кудреватых А.В. Цифровые технологии пост-майнинга 4.0 // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 176-186. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-176-186, EDN: JUKTYU

Горнодобывающая промышленность, будучи локомотивом экономики многих регионов и целых стран, оставляет после себя сложное наследие – объекты, подлежащие рекультивации. К ним относятся открытые и подземные выработки, отвалы вскрышных пород и хвостохранилища, загрязненная почва и озера, которые без восстановления до состояния, близкого к первоначальному, становятся источниками долгосрочных экологических (деградация ландшафтов, загрязнение источников питьевой воды, пыление) и

социально-экономических (потеря земель, угрозы здоровью населения) рисков [1]. Традиционные подходы к рекультивации, часто сводящиеся к техническому и биологическому этапам, являются капиталоемкими, недостаточно гибкими и не обеспечивают полного восстановления экосистемы и экономики добывающих кластеров [2].

При этом мировой объем добычи полезных ископаемых демонстрирует позитивную динамику (Рис. 1), поэтому масштабы техногенного воздействия на окружающую среду

и его негативные последствия постоянно расширяются.

Рост объемов добычи полезных ископаемых, отраженный на Рис. 1, составил: для угля – 7,6%, для железной руды – 28,8%, для медного концентрата – 33,3%, для золота – 22,4%, для редкоземельных металлов – 236%; выплавка алюминия возросла на 47,9%. Вследствие этого состояние экологических проблем горнодобывающих районов во всем мире характеризуется глубокой противоречивостью: с одной стороны, налицо успешные кейсы рекультивации и внедрения «зеленых» стандартов, с другой – сохраняются и множатся зоны хронического бедствия, особенно в развивающихся странах и регионах с низким уровнем контроля.

В частности, расширяется прямое изъятие земель из сельскохозяйственного и промышленного оборота, что дает отрицательный мультипликативный эффект для близлежащих поселений – экологические нарушения ухудшают экономику территории и еще сильнее закрепляют сырьевую специализацию. В результате экологические проблемы накапливаются и не находят экономических решений. Так, под карьерными и шахтными полями, отвалами, хвостохранилищами, инфраструктурой (обогащительные фабрики, дороги) находятся огромные площади, изъятые из экосистемы и любой другой экономической активности, кроме добычи и первичной переработки сырья. Например, карьер Эскондиды (Чили, медь) имеет

размеры 3,7 на 2,7 км и глубину более 645 м. Карьер Бингем-Каньон (США, медь) – один из крупнейших рукотворных объектов на планете (4 км в ширину, 1,2 км в глубину) [4].

В мире ежегодно образуется от 8 до 10 млрд т вскрышных пород и хвостов, для их складирования требуется колоссальное пространство. Только угольная промышленность Китая накопила более 4500 крупных отвалов, занимающих свыше 80 тыс. га.

Трансформация ландшафта в зонах интенсивных открытых и подземных горных работ формирует неестественные формы рельефа – глубокие отрицательные (карьеры) и высокие положительные (отвалы, терриконы). В Кузбассе высота отдельных отвалов превышает 100 м. Добыча полезных ископаемых часто ведет к нарушению гидрологического режима – осушению или подтоплению территорий. В частности, карьерные поля ниже уровня грунтовых вод становятся гигантскими накопителями воды (например, многие железорудные карьеры в Уральском федеральном округе в России), требуя вечной откачки.

Наряду с этим потеря почвенного покрова лишает отработанные карьерные поля и отвалы вскрышных пород возможности полноценной сельскохозяйственной эксплуатации, поскольку на восстановление 1 см плодородной почвы в естественных условиях требуется 100-400 лет. В Индии, в штате Джаркханд, добыча железной руды, угля, золота и бокситов привела к деградации более 50 тыс. га лесов только за

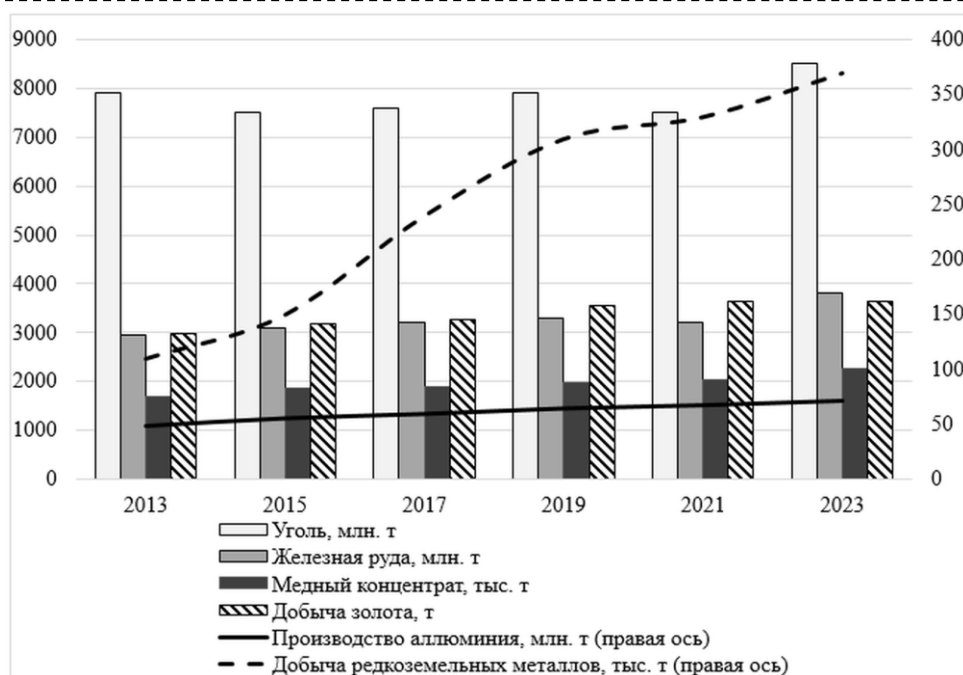


Рис. 1. Мировая динамика добычи твердых полезных ископаемых

Fig. 1. Global dynamics of solid mineral production

(построено авторами по данным [3])

последние два десятилетия [5]. В Рурском бассейне (Германия) исторически нарушено более 120 тыс. га; после закрытия шахт осталось свыше 150 терриконов, многие из которых сегодня рекультивированы в ландшафтные парки или используются для производства ветряной энергии (ветропарки на отвалах) [6]. В США (Аппалачский угольный бассейн) в ходе добычи железной и полиметаллических руд открытым способом зачастую срезались вершины гор, что нарушило свыше 400 тыс. га; более 2000 км русел рек было засыпано [7]. Восстановление этих ландшафтов до исходного состояния признано невозможным. Комбинация открытых и подземных горных работ, плавки и сопутствующей инфраструктуры в Норильском промышленном районе привела к образованию зоны полного уничтожения растительности на площади в десятки тысяч гектаров вокруг комбината «Норникель».

Загрязнение водных ресурсов зачастую менее заметно визуально, но его последствия могут быть катастрофическими и распространяться на огромные расстояния от источника. В частности, кислотное шахтное дренирование (образование серной кислоты, в которой растворяются и мигрируют тяжелые металлы (кадмий, свинец, медь, цинк, мышьяк) и алюминий, может продолжаться сотни и даже тысячи лет после закрытия рудника, его сложно контролировать и практически невозможно нейтрализовать. Долгосрочным последствием является полная гибель водной флоры и фауны («мертвые» реки оранжевого или голубого цвета от гидроксидов железа и алюминия), отравление источников питьевой воды для людей и скота. Что касается загрязнения от хвостохранилищ, то даже при целостности дамбы происходит постоянная фильтрация жидкой фазы, содержащей реагенты (цианиды при золотодобыче, ксантогенаты, кислоты) и тяжелые металлы, в грунтовые воды.

Таким образом, накопленные экологические проблемы требуют комплексного восстановления экосистемы и экономики горнодобывающих кластеров, которое должно простираться далеко за пределы традиционных методов рекультивации. С экономической и социальной точек зрения ответственный пост-майнинг возвращает территории в хозяйственный оборот, создает новые объекты инфраструктуры или рекреации и обеспечивает устойчивое развитие региона после ухода добывающей компании [8].

Пост-майнинг (от англ. post-mining – «после добычи») представляет собой системный и комплексный процесс, охватывающий все этапы управления территорией после завершения промышленной добычи полезных ископаемых. Это не просто техническое «закапывание» карьеров или озеленение отвалов. В

современном понимании пост-майнинг – это стратегия полного жизненного цикла, направленная на безопасное закрытие объектов, восстановление нарушенных экосистем, социально-экономическую реабилитацию регионов и передачу земель в новое, устойчивое и ценное для общества состояние [9].

Ядро пост-майнинга образуют четыре взаимосвязанных блока деятельности [10]. Первый – техническое полное завершение эксплуатации шахт, карьеров, обогатительных фабрик, и обеспечение долгосрочной безопасности всех объектов (консервация подземных выработок, придание долгосрочной устойчивости бортам карьеров и ярусам отвалов для предотвращения оползней, надежная изоляция хвостохранилищ).

Второй, наиболее капиталоемкий блок – рекультивация как комплекс экологических мероприятий по восстановлению экосистемы. Она проходит в три стадии. На техническом этапе восстанавливается физическая целостность ландшафта: выравниваются поверхности, формируются устойчивые формы рельефа, создаются дренажные системы. Химический этап направлен на нейтрализацию опасных веществ, главным образом на борьбу с кислыми шахтными водами, которые образуются при окислении сульфидных пород и отравляют водоемы тяжелыми металлами. Завершает процесс биологическая рекультивация: создание плодородного слоя почвы и подбор специальных растений, способных не только прижиться в сложных условиях, но и поглощать загрязнители.

Третий компонент – социально-экономический редевелопмент, то есть поиск и создание для территории новых эффективных форм хозяйственной деятельности. Успешный пост-майнинг трансформирует проблемные земли в активы. Отработанные карьерные поля могут стать рекреационными парками, как в Рурском бассейне Германии; площадки отвалов пригодны для размещения солнечных электростанций (фотоэлектрических парков). На восстановленных площадях могут создаваться агрокомплексы, промышленные площадки, музеи индустриального наследия. Ключевая задача постмайнинга – создать новые рабочие места и интегрировать добывающие кластеры в жизнь региона, компенсируя уход предприятий, которые во многих случаях играют роль градообразующих.

Четвертый, не менее значимый элемент – многолетний мониторинг и управление техногенными, экологическими и социальными рисками. Даже после всех восстановительных работ нарушенная территория требует постоянного наблюдения за стабильностью конструкций, качеством воды и состоянием экосистем. Для финансирования такого

мониторинга и непредвиденных работ еще на стадии проектирования разработки месторождений должны быть сформированы специальные финансовые фонды (депозиты, страхование, государственные гарантии), чтобы время восстановления экосистемы и стимулирования экономической активности не легло на будущие поколения.

В соответствии с полнотой реализации всех четырех элементов пост-майнинга в предыдущей статье [11] мы выделили четыре поколения его развития, которые прошли как развивающиеся, так и передовые страны, и которые представлены ниже.

*Пост-майнинг 1.0: ликвидация горнодобывающих предприятий и «закапывание» проблемы (в передовых странах – до 1970-х гг.)*

Первый этап соответствует преобладанию идеи оставления горнодобывающих территорий после завершения эксплуатации месторождений в том виде, в который они пришли, отселения оставшегося населения и перекладывания экологических и экономических проблем на местные власти. По сути это есть концепция «ликвидации беспорядка» с целью привести территорию в условно безопасное и эстетически приемлемое состояние после окончания добычи до полного истощения месторождения. Ключевыми технологиями пост-майнинга 1.0 являются: механическое выравнивание отвалов и террасирование склонов бульдозерами для предотвращения оползней, простое захоронение токсичных отходов (например, засыпка хвостов грунтом), контурная засыпка карьеров бытовыми и строительными отходами, посев неприхотливых травянистых растений для быстрого задернения.

Управление процессами пост-майнинга 1.0 осуществлялось при отсутствии единых стандартов, рекультивация проводилась по остаточному принципу распределения расходов – как разовая акция, по причине отсутствия законодательно закреплённой долгосрочной ответственности недропользователя. Отсюда и неустойчивые результаты пост-майнинга 1.0 – на территориях с технически рекультивированными зонами горных работ высокой интенсивности периодически происходят просадки грунта, проявление кислотного дренажа, эрозии почв, формирование техногенных пустошей.

*Пост-майнинг 2.0: биоцентрический подход и экологическое регулирование (1970-е – 2000-е гг.)*

Второй этап связан с ростом экологического сознания, появлением природоохранного законодательства и развитием специфических знаний в области биологии, почвоведения, ландшафтного планирования, законодательства и экономики устойчивого развития. Концепция второго этапа эволюции пост-майнинга предусматривает «восстановление экологических

функций» территории – ее биопродуктивности и привлекательности для ведения сельского хозяйства, строительства относительно небольших сельских и городских поселений. Планирование рекультивации здесь начинается на стадии проектирования эксплуатации месторождения, но реализуется преимущественно после его закрытия.

Ключевые технологии пост-майнинга 2.0 представляют собой постадийную рекультивацию (разделение на технический – планировка, формирование плодородного слоя, мелиорация, и биологический – подбор фитоценозов – этапы), фиторемедиацию (целенаправленное использование растений для поглощения, детоксикации или иммобилизации тяжелых металлов), искусственное формирование почвенной массы (рекультивационных почвогрунтов – из различных субстратов, таких как торф, компост, глина, опилки), проектирование будущего рельефа с учетом гидрологии, эрозионных процессов, будущих хозяйственно-экономических и инфраструктурных требований (будущие дороги, ЛЭП, водоснабжение).

Второй этап развития пост-майнинга связан с появлением жестких государственных стандартов к рекультивации в результате осознания остроты и долгосрочности накопившихся экологических проблем добывающих территорий. В результате в развитых странах был внедрен принцип «загрязнитель платит» – требование к компаниям предоставлять планы рекультивации и финансовые гарантии их выполнения. В результате процесс восстановления экосистем добывающих кластеров стал более устойчивым (восстановление лесов, лугов, водоемов), но вместе с тем ресурсоемким, длительным и плохо прогнозируемым из-за сложности биологических процессов.

*Пост-майнинг 3.0: технологии мониторинга и адаптивного управления (2000-е – 2010-е гг.)*

Третий этап обусловлен цифровой революцией, удешевлением сенсоров и появлением ГИС-технологий, позволивших сместить акценты с однократных мер на непрерывное наблюдение и управление экосистемой («адаптивное управление на основе данных») – параллельно с добычей и на десятилетия после рекультивации.

Ключевые технологии пост-майнинга 3.0 включают в себя дистанционное зондирование земли (регулярную космическую и аэрофотосъемку для оценки состояния растительного покрова, выявления термальных аномалий, ускорения эрозии почв), стационарные сети датчиков (пьезометров, тензометров, сейсмографов для мониторинга

стабильности отвалов и хвостохранилищ, датчиков химического состава вод), геоинформационные системы (ГИС) для интеграции пространственных данных в ходе создания цифровых карт опасных зон и планирования восстановительных работ, биомониторинг (оценку состояния экосистем по биоиндикаторам – например, по составу почвенной микрофлоры или насекомых).

Модель управления пост-майнингом 3.0 основана на переходе к проактивному выявлению проблем (например, предупреждение об угрозе прорыва дамбы по данным о деформациях). Данные мониторинга становятся основанием для корректировки планов рекультивации и диалога с регуляторами. В результате эффективность восстановления биоразнообразия значительно выросла, однако системы мониторинга во многих случаях остаются фрагментированными, данные обрабатываются с задержкой, а прогнозы носят вероятностный характер.

*Пост-майнинг 4.0: киберфизические системы, цифровые двойники и экономика замкнутого цикла (2020-е – настоящее время с проекцией в будущее)*

Четвертый этап является частью четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) и предполагает конвергенцию биологических, физических и цифровых систем для создания самообучающихся, предиктивных и экономически эффективных систем управления процессами восстановления экологических, хозяйственных и социальных систем в горнодобывающих кластерах. В основе этого лежит концепция «управление полным жизненным циклом на основе данных как услуги». Пост-майнинг перестает быть отдельной фазой, а становится непрерывной функцией на всем протяжении существования горного проекта – от разведки до редевелопмента, что позволяет максимизировать

долгосрочную ценность территории. Поэтому цифровое проектирование рекультивации начинается одновременно с проектированием разработки месторождения.

Ключевые технологии пост-майнинга 4.0 включают в себя цифровые двойники процессов (динамические виртуальные копии, объединяющие 3D-геомодель, данные IoT-сенсоров в реальном времени, гидрогеологические и биологические симуляторы), распределенные сети Интернета вещей и беспилотные системы (автономные дроны для лидарного сканирования и спектрометрии, роботизированные платформы для отбора проб, самообучающиеся сети датчиков), искусственный интеллект и предиктивную аналитику, блокчейн и смарт-контракты для автоматического управления финансовыми гарантиями, которые конвертируются в платежи при достижении заданных и верифицируемых показателей состояния объекта. Управленческая модель пост-майнинга 4.0 включает в себя редевелопмент как сервис (на основе данных цифрового двойника инвестору предлагаются проработанные сценарии развития территории, такие как ветро- или фотоэлектрический парк, агрокомплекс, дата-центры и майнинговые фермы, рекреационные зоны). Ожидаемые результаты реализации пост-майнинга 4.0: радикальное снижение непредвиденных затрат и рисков, превращение бывших горнодобывающих предприятий и территорий их базирования из источников техногенных угроз в платформы для создания новой стоимости.

Сравнение этапов развития пост-майнинга отражено в Таблице 1.

Несмотря на определенные успехи в США и странах Западной Европы [11], переход к пост-майнингу 4.0 связан с определенными ограничениями:

- высокие капитальные затраты на создание

Таблица 1. Сравнительный анализ этапов эволюции пост-майнинга

Table 1. Comparative analysis of the stages of post-mining evolution

Критерии	Пост-майнинг 1.0	Пост-майнинг 2.0	Пост-майнинг 3.0	Пост-майнинг 4.0
Концепция	Ликвидация беспорядка	Восстановление функций	Адаптивное управление	Создание новой ценности
Период реализации	После добычи	Планирование до, действие после	Параллельно и после	Постоянно
Ключевой актив	Техника	Почва, растения	Данные дистанционного зондирования земли и датчиков	Цифровой двойник, аналитические алгоритмы
Экономическая основа	Текущие затраты	Штрафы	Затраты на снижение рисков	Инвестиции в данные и сервисы
Управление	Реактивное	Плановое	Проактивное	Предиктивное и автономное

Составлено авторами

цифровой инфраструктуры и привлечение высококвалифицированных кадров;

- кибербезопасность – уязвимость распределенных сетей Интернета вещей и цифровых двойников для хакерских атак;

- нормативное отставание – национальные законодательства не успевают за технологиями, не признавая данные цифровых двойников официальным доказательством;

- цифровое неравенство – крупные добывающие корпорации имеют доступ к технологиям пост-майнинга 4.0, в то время как средние и мелкие компании могут использовать только технологии пост-майнинга 2.0-3.0.

Цифровая технологическая платформа пост-майнинга 4.0 представляет собой комплекс киберфизических систем, обеспечивающих сквозное, предиктивное и экономически эффективное управление жизненным циклом горнодобывающих территорий [12]. Ядро такой платформы – цифровой двойник – динамическая виртуальная копия физического объекта (карьера, отвала, хвостохранилища), интегрирующая многомерные данные и модели. Технологическая платформа пост-майнинга имеет несколько слоев.

Первый слой – «умные сенсоры» – распределенные сети датчиков, подключенных к Интернету вещей (тензометры, пьезометры, мультигазовые анализаторы) [13], которые в режиме реального времени фиксируют геомеханические, гидрологические и химические параметры. Дистанционное зондирование (лидар, гиперспектральная съемка с дронов, спутниковый InSAR) обеспечивает синоптический мониторинг деформаций, состояния растительности и термальных аномалий.

Второй слой – предиктивная аналитика и искусственный интеллект. Поток данных обрабатывается с помощью систем машинного обучения, алгоритмы которого выявляют скрытые проблемы, прогнозируют риски (прорывы дамб, оползни, кислотный дренаж) и моделируют долгосрочную динамику восстановления экосистемы. Большие данные от исторических и текущих наблюдений становятся основой для предиктивных моделей.

Третий слой – интеграция данных и управление процессами. Все компоненты объединяются на единой платформе (виртуальном центре управления), визуализирующей данные через интерактивные 3D-модели и дашборды. Это позволяет моделировать сценарии рекультивации, оптимизировать ресурсы и автоматически генерировать отчеты. Блокчейн призван обеспечивать доверие к данным и автоматизировать выполнение смарт-контрактов при достижении целевых показателей

восстановления.

Таким образом, цифровая основа пост-майнинга 4.0 трансформирует рекультивацию и экономическую ревитализацию горнодобывающей территории из затратной, реактивной деятельности в управляемый на основе данных, непрерывный и проактивный процесс, создающий основу для нового импульса социально-экономического развития после прекращения добычи полезных ископаемых.

*Цифровой двойник объекта пост-майнинга: ядро новой парадигмы*

Цифровой двойник (Digital Twin) – это виртуальная копия физического объекта, обновляемая в реальном времени данными, поступающими с «умных» датчиков [14]. Для объекта пост-майнинга он становится центральной платформой управления, интегрирующей следующие виды данных:

- геопространственные данные (3D-модели рельефа, карты недр, построенные по данным лазерного сканирования (LiDAR) и аэрофотосъемки);

- данные дистанционного зондирования (мульти- и гиперспектральная съемка со спутников и дронов для оценки состояния растительности, выявления термальных аномалий, эрозии);

- данные сенсорных сетей Интернета вещей (датчики уровня воды, горного давления, устойчивости техногенных массивов, химического состава дренажных вод, газовых эмиссий и пр.);

- физико-математические и гидрогеологические модели, прогнозирующие поведение объекта.

Применение цифрового двойника дает возможность моделирования различных сценариев рекультивации, прогнозирования прорывов дамб хвостохранилищ, оптимизации режимов водоотлива и визуализации процесса восстановления для стейкхолдеров (местных сообществ, инвесторов). Также цифровой двойник позволяет моделировать сценарии последствий сильных дождей или смены схем рекультивации, оптимизировать процессы в реальном времени и обеспечивать прозрачность финансирования мероприятий пост-майнинга для государства и стейкхолдеров.

*Технологии сбора данных: Интернет вещей и дистанционное зондирование земли*

Интернет вещей [15] в пост-майнинге 4.0 предполагает развертывание беспроводных сетей автономных датчиков, которые контролируют критически важные параметры объекта: деформации (инклинометры, тензометры), гидрологический режим (пьезометры), качество воды и воздуха. Системы с низким энергопотреблением (LPWAN, LoRaWAN) идеально подходят для обширных и

труднодоступных территорий горнодобывающих кластеров.

В свою очередь, дистанционное зондирование земли обеспечивает синоптический, многолетний и мультиспектральный анализ. Спутниковая радиолокационная интерферометрия (InSAR) позволяет отслеживать миллиметровые смещения поверхности (просадки, оползни). Данные дронов дают сверхвысокое разрешение для детального картирования.

*Аналитика и интеллектуализация: Большие данные, искусственный интеллект и платформенные решения*

Алгоритмы машинного обучения на больших массивах исторических и текущих данных [16] прогнозируют риски геотехнических аварий, динамику миграции загрязняющих веществ, успешность заполнения пространств растительностью, оптимальные экономические сценарии последующего использования территории.

Поток данных от датчиков Интернета вещей и дистанционного зондирования земли формирует пулы «Больших данных». Искусственный интеллект и машинное обучение применяются для автоматической классификации и обнаружения изменений на снимках (например, выявление очагов эрозии или несанкционированной деятельности), прогнозного моделирования (машинные алгоритмы, обученные на исторических данных, могут прогнозировать уровень кислотных дренажных вод, динамику оседания загрязнителей, вероятность оползней и обрушений и пр.), оптимизации рекультивационных процессов (алгоритмы могут оптимизировать маршруты и режимы работы техники, снижать затраты и выбросы в атмосферу).

Данные от всех источников поступают в единую геоинформационную платформу или панель управления (дашборд [17]), которая позволяет обеспечить сквозную прозрачность для всех участников процесса (компания, надзорные органы, общественность), автоматически генерировать отчеты и оповещения о превышении критических порогов, использовать технологии дополненной и виртуальной реальности для обучения персонала, планирования работ и вовлечения общественности путем виртуальных туров по объекту и демонстрации планов его преобразования.

*Новые экономические модели (редевелопмент) на основе Больших данных*

Цифровые технологии открывают путь к редевелопменту – преобразованию пост-майнинговых территорий в новые ценные для местного населения объекты. Цифровой двойник позволяет моделировать и оценивать различные

сценарии последующего использования, такие как:

1. Возобновляемая энергетика, развитие которой требует оптимального размещения солнечных панелей или ветряных генераторов на устойчивых участках отвалов.

2. Аквакультура и водохранилища, развитие которых невозможно без моделирования и мониторинга качества воды и биологических процессов в заполненных карьерах.

3. Рекреация и туризм, для которых необходима 3D-визуализация будущих ландшафтных парков, горных курортов или объектов экотуризма.

4. Промышленное использование, предполагающее первичную оценку пригодности площадок для логистических хабов.

Наряду с очевидными преимуществами для восстановления горнодобывающей территории, пост-майнинг 4.0 сталкивается с определенными вызовами и барьерами развития, такими как высокие первоначальные инвестиции в оборудование и программное обеспечение, дефицит квалифицированных кадров на стыке горного дела, геоинформатики, искусственного интеллекта, аналитики Больших данных, кибербезопасности и проблемы связи и энергоснабжения на удаленных объектах, а также несовершенство нормативной базы, не учитывающей использование данных цифровых двойников в качестве официального инструмента мониторинга.

Эволюция от пост-майнинга 1.0 к 4.0 отражает общий тренд развития геотехнологии в 21 в.: от грубого вмешательства в природу – к тонкому, основанному на глубоких данных управлению сложными системами. Если этапы пост-майнинга 1.0 и 2.0 были антропоцентричны (максимальные выгоды для человека, а не для природы), а пост-майнинг 3.0 – экоцентричен (баланс выгод), то пост-майнинг 4.0 становится техноцентричным (цифровые технологии выступают посредником и катализатором достижения как экологических, так и экономических целей). Будущее восстановление экологии и социально-экономических систем горнодобывающих районов принадлежит гибридным системам, где биологические процессы направляются и оптимизируются киберфизическими. Горнодобывающая компания будущего – это не только производитель сырья, но и управляющая компания по жизненному циклу территории, создающая ценность через данные и сервисы даже после окончания добычи. Переход к пост-майнингу 4.0 – это не просто технологическая модернизация добывающей отрасли, это смена парадигмы, при которой ответственность за территорию становится источником инноваций и долгосрочной устойчивости. Цифровые технологии пост-

майнинга 4.0 представляют собой революционный сдвиг в управлении промышленным наследием добывающего региона. Создание цифрового двойника объекта, снабжаемого данными от «умных» датчиков на основе Интернета вещей и дистанционного зондирования земли, усиленного аналитикой на основе искусственного интеллекта, позволяет перейти от эпизодического контроля состояния экосистемы к комплексному управлению жизненным циклом. Это обеспечивает экологическую безопасность территории, снижает долгосрочные финансовые обязательства, повышает социальную ответственность предприятий и открывает новые возможности для редевелопмента территорий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические проблемы угледобывающих регионов России. М. : Росприроднадзор, 2023. URL: [https://rpn.gov.ru/upload/ecology\\_problems.pdf](https://rpn.gov.ru/upload/ecology_problems.pdf) (последнее обращение: 16.01.2026)
2. Шубин А. А. Задачи постмайнинга в период активизации техногенных процессов // ГИАБ. 2006. № 3. С. 115–117.
3. BP Energy Outlook: 2024 edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf> (последнее обращение: 16.01.2026)
4. 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.
5. Zeqiri K. Mining, mine closure, post-mining and transition // Proceedings of Conference «PODEK-POVEKS-2024». Ohrid : Macedonia. 2024. Pp. 87–98.
6. Международная строительная выставка «Эмшер-Парк». URL: <https://www.internationale-bauausstellungen.de/en/history/1989-1999-iba-emscher-park-a-future-for-an-industrial-region> (последнее обращение: 16.01.2026).
7. Медно-порфировое месторождение «Беркли Пит». URL: <https://pitwatch.org> (последнее обращение: 16.01.2026).
8. Яночки Ю., Чеклар М., Симкова З. «Браунфилд» как методология ревитализации экономики горнодобывающих территорий // Экономика и управление инновациями. 2017. № 3(3). С. 32–45.
9. Pratiwi P., Narendra B. H., Siregar C. A., Iskandar I. Tin Mining and Post-Tin Mining Reclamation Initiatives in Indonesia: With Special Reference to Bangka Belitung Areas // Land. 2025. Vol. 14(10). Art. 1947.
10. 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. Art. 00084.
11. Жиронкин С. А., Кудреватых А. В., Коновалова М. Е., Абу-Абед Ф. Н., Жиронкина О. В. От пост-майнинга 1.0 к 6.0 – анализ зарубежного опыта // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2025. № 6 (172). С. 114–126.
12. 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.
13. Аннабердиев А., Мурадова Д., Джомартов М. Умные системы мониторинга и управления в горнодобывающей промышленности // Символ науки. 2025. № 3–2. С. 23–25.
14. Гурбанмырадов М., Мырадова Дж., Бегмырадов С. Цифровой двойник горного предприятия // Символ науки. 2025. № 1–1–2. С. 49–51.
15. Мышлецов А. И., Авруцкая С. Г. Внедрение цифровых технологий в горнодобывающей отрасли // Успехи в химии и химической технологии. 2022. № 1(250). С. 70–73.
16. Панина О. В., Попадюк Н. К., Еремин С. Г., Токмурзин Т. М., Разумова Е. В. Применение технологий BigData для оптимизации производственных процессов в горнодобывающей промышленности России: анализ внедрения и эффективности // Горная промышленность. 2024. № 6. С. 178–185.
17. Храмовских В. А., Шевченко А. Н., Непомнящих К. А. Адаптивный интеллектуальный анализ данных как инструмент для прогнозирования ресурса узлов горных машин и оборудования // Науки о Земле и недрапользование. 2023. Т. 46. № 2. С. 212–225.

© 2026 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, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: [zhironkinsa@kuzstu.ru](mailto:zhironkinsa@kuzstu.ru)

Жиронкина Ольга Валерьевна, кандидат пед. наук, доцент, Кемеровский государственный университет, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, e-mail: o-zhironkina@mail.ru

Коновалова Мария Евгеньевна, доктор экон. наук, профессор, Самарский государственный экономический университет, 443090, Россия, г. Самара, ул. Советской Армии, 141, e-mail: ecun@sseu.ru

Кудреватых Андрей Валерьевич, кандидат тех. наук, доцент, заведующий кафедрой, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, e-mail: kav.ea@kuzstu.ru

*Заявленный вклад авторов:*

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

Жиронкина Ольга Валерьевна – сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Коновалова Мария Евгеньевна – обзор существующей литературы, сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

Кудреватых Андрей Валерьевич – сбор и анализ данных, написание текста, оформление статьи по требованиям.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## Original article

### POST-MINING 4.0 DIGITAL TECHNOLOGIES

Sergey A. Zhironkin <sup>1</sup>, Olga V. Zhironkina <sup>2</sup>,  
Maria E. Konvalova <sup>3</sup>, Andrey V. Kudrevatykh <sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Kemerovo State University

<sup>3</sup> Samara State Economic University

\* for correspondence: zhironkinsa@kuzstu.ru



#### Article info

Received:

18 January 2026

Accepted for publication:

31 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

29 June 2026

**Keywords:** Post-mining 4.0, Industry 4.0, digital twin, Internet of Things, artificial intelligence, reclamation

#### Abstract.

The article presents a concept for the evolution of approaches to the reclamation of raw material clusters disturbed by mining operations, including Post-mining 1.0 (mechanical elimination of consequences), Post-mining 2.0 (biocentric and normative approach), Post-mining 3.0 (technological monitoring) and Post-mining 4.0 (cyber-physical systems and territory lifecycle management). The objective of the article is to systematize and analyze the application of digital technologies for the integrated lifecycle management of Post-mining objects. The research hypothesis is the following: each new stage of Post-mining expands its timeframe (from elimination of consequences to full lifecycle management), spatial coverage (from the site to the ecosystem and territory) and transforms the economic essence of the process (from costs to investments). It is shown that the transition to each new stage does not cancel the previous ones, but builds on them, increasing complexity, preventiveness and economic efficiency. Particular attention is paid to fourth-stage technologies: digital twins, the Internet of Things, artificial intelligence, and predictive analytics, which transform Post-mining into a source of data and new business models for the sustainable development of mining territories. It has been proven that the integration of these technologies enables a transition from one-time cleanup measures to the creation of long-term, sustainable ecosystems and new economic models for revitalization.

**For citation:** Zhironkin S.A., Zhironkina O.V., Konovalova M.E., Kudrevatykh A.V. Post-mining 4.0 digital technologies. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):176-186. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-176-186, EDN: JUKTYU

## REFERENCES

1. Ekologicheskie problemy ugledobyvayushchih regionov Rossii. M.: Rosprirodnadzor; 2023 [Environmental Problems of Coal Mining Regions of Russia. Moscow: Rosprirodnadzor; 2023]. URL: [https://rpn.gov.ru/upload/ecology\\_problems.pdf](https://rpn.gov.ru/upload/ecology_problems.pdf) (last access: 16.01.2026)
2. Shubin A.A. Zadachi postmajninga v period aktivizacii tekhnogennyh processov [Postmining Tasks during the Period of Activation of Technogenic Processes]. *GLAB*. 2006; 3:115–117.
3. BP Energy Outlook: 2024 edition. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2024.pdf> (last access: 16.01.2026)
4. Kretschmann J., Goerke-Mallet P., Dauber C., Hegemann M. Post-mining for a bet-ter 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.
5. Zeqiri K. Mining, mine closure, post-mining and transition. *Proceedings of Confer-ence "PODEK-POVEKS-2024"*. Ohrid: N. Macedonia; 2004. Pp. 87–98.
6. Mezhdunarodnaya stroitel'naya vystavka "Emscher-Park" [International Construction Exhibition "Emscher Park"] URL: <https://www.internationale-bauausstellungen.de/en/history/1989-1999-iba-emscher-park-a-future-for-an-industrial-region> (last access: 16.01.2026).
7. Medno-porfirovye mestorozhdenie «Berкли Pit» [Berkeley Pit porphyry copper deposit]. URL: <https://pitwatch.org> (last access: 16.01.2026).
8. Yanochko Yu., Cheklar M., Simkova Z. "Braunfeld" kak metodologiya revitalizacii ekonomiki gornodobyvayushchih territorij ["Brownfield" as a methodology for revitalizing the economy of mining areas]. *Ekonomika i upravlenie innovacijami = Economy and Management of Innovations*. 2017; 3(3):32–45.
9. Pratiwi P., Narendra B.H., Siregar C.A., Iskandar I. Tin Mining and Post-Tin Mining Reclamation Initiatives in Indonesia: With Special Reference to Bangka Belitung Areas. *Land*. 2025; 14(10):1947.
10. 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.
11. Zhironkin S.A., Kudrevatykh A.V., Konovalova M.E., Abu-Abed F.N., Zhi-ronkina O.V. Ot postmajninga 1.0 k 6.0 – analiz zarubeznogo opyta [From post-mining 1.0 to 6.0 – analysis of foreign experience]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 2025; 6(172):114–126.
12. Abu-Abed F.N. Primenenie tekhnologij intellektual'nogo upravleniya i biznes-proektirovaniya Industrii 5.0 v Majninge 5.0 [Application of intelligent management technologies and business design of Industry 5.0 in Mining 5.0]. *Ekonomika i upravlenie innovacijami = Economy and Innovation Management*. 2022; 3:50–59.
13. Annaberdiev A., Muradova D., Dzhomartov M. Umnye sistemy monitoringa i upravleniya v gornodobyvayushchej promyshlennosti [Smart monitoring and control systems in the mining industry]. *Simvol nauki = Symbol of Science*. 2025; 3–2:23–25.
14. Gurbanmyradov M., Myradova Dzh, Begmyradov S. Cifrovoj dvojniki gornogo predpriyatiya [Digital twin of a mining enterprise]. *Simvol nauki = Symbol of Science*. 2025; 1–1–2:49–51.
15. Myshlecov A.I., Avruckaya S.G. Vnedrenie cifrovih tekhnologij v gorno-dobyvayushchej otrasli [Implementation of digital technologies in the mining industry]. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii = Advances in chemistry and chemical technology*. 2022; 1(250):70–73.
16. Panina O.V., Popadyuk N.K., Eremin S.G., Tokmurzin T.M., Razumova E.V. Primenenie tekhnologij BigData dlya optimizacii proizvodstvennyh processov v gornodobyvayushchej promyshlennosti Rossii: analiz vnedreniya i effektivnosti [Application of BigData technologies to optimize production processes in the mining industry of Russia: analysis of implementation and efficiency]. *Gornaya promyshlennost' = Mining industry*. 2024; 6:178–185.
17. Hramovskih V.A., Shevchenko A.N., Nepomnyashchih K.A. Adaptivnyj intel-lectual'nyj analiz dannyh kak instrument dlya prognozirovaniya resursa uzlov gornyh mashin i oborudovaniya [Adaptive intelligent data analysis as a tool for predicting the resource of mining machine and equipment components]. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth Sciences and Subsoil Use*. 2023; 46(2):212–225.

© 2026 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, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennya st., 28, e-mail: zhironkinsa@kuzstu.ru

**Olga V. Zhironkina**, candidate of Pedagogy, Associate Professor, Kemerovo State University, 650000, Russia, Kemerovo, st. Krasnaya, 6, e-mail: o-zhironkina@mail.ru

**Maria E. Konovalova**, Doctor of Economics. Sciences, Professor, Samara State Economic University, 443090, Russia, Samara, Krasnoy Armii st., 141, e-mail: ecun@sseu.ru

**Andrey V. Kudrevatykh**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 650000, Russia, Kemerovo, Vesennya st., 28, e-mail: kav.ea@kuzstu.ru

*Contribution of the authors:*

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

Olga V. Zhironkina – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements.

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

Andrey V. Kudrevatykh – data collection and analysis, writing a text, formatting an article according to requirements

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

