



Архитектура подтверждения неизменности цифровой документации в горной промышленности с использованием блокчейна

Е.В. Логинов ✉, С.С. Питерин

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ loginov_ev@pers.spmi.ru

Резюме: В настоящее время при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом применяется большое количество цифровых документов. В статье представлена двухконтурная архитектура доказуемого подтверждения существования и неизменности цифровой документации горных предприятий на основе распределенного реестра. Разработана формальная модель цифрового артефакта, охватывающая как текстовые документы, так и пространственно-координатные данные учета. Для фиксации состояния документального пакета применяется криптографическое хеширование: во внешний контур передается исключительно дайджест, тогда как исходные производственные данные остаются в периметре предприятия. Разработан программный модуль, реализующий алгоритмы формирования составного хеша, его записи в распределенный реестр и последующей независимой верификации. В ходе исследования установлено, что предложенный подход обеспечивает воспроизводимую постфактум-проверяемость без раскрытия коммерчески чувствительных сведений и без зависимости от доверенного посредника. Дальнейшее развитие предложенного подхода связано с расширением охвата типов документации: интеграцией данных геологического моделирования, результатов инструментального контроля устойчивости бортов, а также документации по обращению с горнопромышленными отходами. Перспективным направлением является встраивание механизма верификации непосредственно в системы управления горными работами, что позволит перейти от ретроспективной проверки к непрерывному мониторингу целостности производственной документации в режиме реального времени.

Ключевые слова: горная промышленность, открытые горные работы, распределенный реестр, внутренний контур, внешний контур, целостность данных, хеширование, аудиторский след, независимая проверка

Для цитирования: Логинов Е.В., Питерин С.С. Архитектура подтверждения неизменности цифровой документации в горной промышленности с использованием блокчейна. *Горная промышленность*. 2026;(4S):54–60. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-54-60>

Blockchain-based architecture for verifying the integrity of digital documentation in the mining industry

E.V. Loginov ✉, S.S. Piterin

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation
✉ loginov_ev@pers.spmi.ru

Abstract: Currently, a significant volume of digital documentation is utilized in the open-pit mining of mineral deposits. This paper presents a dual-circuit architecture for verifiable confirmation of availability and integrity of digital documentation in mining companies using a distributed ledger. A formal model of the digital artifact is developed, encompassing both textual documents and spatial-coordinate data from mine surveying records. Cryptographic hashing is employed to capture the state of a document package: only the resulting digest is transmitted to the external circuit, while the original production data remain within the enterprise perimeter. A software module has been developed that implements the algorithms for composite hash generation, registration in the distributed ledger, and subsequent independent verification. The study demonstrates that the proposed approach ensures reproducible post-hoc verifiability without disclosing commercially sensitive information and without reliance on a trusted intermediary. Viability of the architecture is validated through a complete lifecycle scenario of a mine development plan. Further development of the proposed approach involves broadening the scope of documentation types covered, including integration of the geological modelling data, results of slope stability instrumental monitoring, and



documentation related to mining waste management. A promising direction is embedding of the verification mechanism directly into mining management systems, enabling a transition from retrospective auditing to continuous real-time integrity monitoring of the production documentation.

Keywords: mining industry, open-pit mining, distributed ledger, internal circuit, external circuit, data integrity, hashing, audit trail, independent verification

For citation: Loginov E.V., Piterin S.S. Blockchain-based architecture for verifying the integrity of digital documentation in the mining industry. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):54–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-54-60>

Введение

Цифровая трансформация горной промышленности привела к тому, что значительная часть значимой документации существует и обращается исключительно в электронной форме: проектные документы, технологические регламенты, журналы операций, отчетность, данные о состоянии выработок и положении объектов недр. Данная документация одновременно является техническим описанием состояния работ, основанием для инженерных решений и доказательственным ресурсом при внешних проверках, экспертизах и расследованиях [1; 2]. Минеральные ресурсы являются основой развития государства. Планы развития горных работ, пространственные модели выработок и сопряженные документы используются на протяжении всего жизненного цикла предприятия, нередко превышающего срок службы конкретных систем хранения [3]. В настоящее время активно развиваются методы цифрового моделирования на открытых горных работах [4; 5].

Задача подтверждения подлинности таких данных не сводится к их хранению: принципиально важно обеспечить независимую проверку того, что предъявленная при аудите версия пакета действительно существовала на заявленный момент и не изменялась после фиксации. Между тем механизмы хранения, версионирования и журналирования находятся в сфере деятельности самого недропользователя, что создает архитектурное противоречие. Документ должен быть пригоден для независимой проверки, тогда как вся среда его хранения подконтрольна стороне, чьи действия и оцениваются. Возможное решение связано с разделением функций хранения данных и фиксации их состояния: если независимый внешний реестр фиксирует только криптографическое представление состояния артефакта, у внешней стороны появляется техническая возможность позднее воспроизвести проверку, не полагаясь на внутренние сведения оператора. Существующие централизованные механизмы: электронная подпись, СЭД, журналы событий, резервное копирование выполняют важные функции защиты, но не устраняют указанное противоречие, поскольку функционируют в пределах инфраструктуры самого оператора [6].

Прямое приложение принципа цифрового следа к документации в горной промышленности осложнено тремя обстоятельствами, систематически не проработанными в литературе: цифровой артефакт является не одиночным файлом, а композитным пакетом разнородных компонентов (графика, координатные таблицы, цифровые модели, журналы измерений), поэтому подтверждение целостности должно охватывать одновременно содержание компонентов и состав пакета; документация имеет длительный жизненный цикл и множество версий, что требует регла-

ментированного выбора момента фиксации; сведения различной чувствительности делают публикацию исходного содержания во внешнюю среду недопустимой.

При разработке месторождений открытым способом [7] используются объемные электронные комплекты документов, учитывающие порядок разработки карьера, соблюдение правил безопасности, экологических и технических аспектов [8; 9]. Горнодобывающие предприятия функционируют в единой технологической цепи с перерабатывающим и энергетическим секторами. Комплексный подход к работе всего звена является ключевым условием экономической эффективности [10]. Объектом исследования является цифровая документация горной промышленности, значимая для производственного управления, контроля, экспертизы и аудита. Предметом является архитектурный подход к доказуемому подтверждению ее существования и неизменности на основе распределенного реестра. Цель работы заключается в разработке и обосновании подхода с демонстрацией прикладной применимости на сценарии жизненного цикла плана развития горных работ. Научный вклад заключается в адаптации принципа двухконтурной фиксации к специфике документации в горной промышленности с длительным жизненным циклом, в формализации модели цифрового артефакта, учитывающей одновременно содержание компонентов и состав пакета, и в описании воспроизводимых процедур фиксации и проверки, не требующих публикации исходного содержания.

Цифровизация горной отрасли

Современные цифровые технологии в горной промышленности подразумевают под собой использование большого количества электронных документов. Основная документация, представленная пространственными и координатными данными, имеет большие размеры [11]. Современные подходы к управлению такими данными опираются на интегрированные GIS-, CAD- и BIM-среды, поддерживающие единое представление о состоянии горных работ и их соотношении с геологическими и проектными моделями [12; 13]. При этом рост объема и сложности цифровых данных сопровождается усилением версионной неопределенности: для пользователя, лишенного доступа к внутренним журналам системы, принципиально сложнее достоверно установить, какая именно версия документа считалась действующей в заданный момент времени [14].

Традиционные механизмы подтверждения целостности

В настоящее время горная промышленность показывает высокий уровень цифровизации и автоматизации. На от-

крытых горных работах применяются современные виды роботизированного транспортного оборудования [15–17]. Цифровые документы требуют защиты от несанкционированного изменения. В данных условиях применяется широкий спектр средств защиты: системы электронного документооборота с встроенным версионированием, журналы аудиторских событий, резервное копирование, разграничение прав доступа, электронная подпись, доверенные службы временных меток. Эти механизмы существенно повышают общий уровень безопасности и применимы к большинству типов производственной документации.

Однако в задачах независимой проверки они обладают характерным ограничением. Все перечисленные механизмы реализуются в пределах информационной среды организации-оператора либо в среде ее доверенных подрядчиков. Внешняя сторона, оценивающая корректность действий недропользователя, фактически вынуждена доверять журналам и метаданным той же организации, чьи действия и проверяются. Электронная подпись подтверждает факт подписания, но не препятствует последующему изменению хранимого экземпляра подписанного документа. Доверенная временная метка фиксирует существование одиночного файла в определенный момент, но плохо приспособлена для подтверждения состояния составного пакета и связей между его компонентами [18; 19].

Криптографическое хеширование и доказательство существования

Криптографическая хеш-функция позволяет получить компактное представление произвольных данных, обладающее свойствами вычислительной односторонности и стойкости к коллизиям. На этом свойстве основан широко используемый принцип proof-of-existence (доказательство существования): публикация хеша некоторого объекта в трудно изменяемой среде позволяет впоследствии доказать, что данный объект существовал не позднее момента публикации. Технологически похожие схемы были предложены до появления распределенных реестров, в частности на основе деревьев хешей и доверенных служб timestamping (временных меток).

Распределенные реестры расширяют эти возможности, добавляя свойство неподконтрольности отдельной организации: однажды зафиксированная запись не может быть незаметно отредактирована или удалена без согласованных действий значительной части участников сети. Именно это свойство, а не способность хранить произвольные данные, является ключевым с точки зрения задачи независимой проверки.

Архитектурный прием, при котором во внешнем реестре фиксируется не сам документ,

а его криптографическое представление, известен как blockchain anchoring. Подход позволяет разделить функции хранения данных и фиксации их состояния: организационная информационная система продолжает выполнять задачи документооборота, тогда как реестр используется как внешний контур проверяемости. Это снижает нагрузку на сеть, ограничивает риск раскрытия конфиденциальных сведений и делает использование распределенных реестров реалистичным для отраслей с консервативной информационной инфраструктурой [20; 21].

Таким образом, формируется исследовательский разрыв, на закрытие которого направлена настоящая работа: разработка архитектурного подхода, обеспечивающего доказуемую постфактум-проверяемость состояния цифрового пакета документации горной отрасли в условиях недоверенного оператора хранения и без публикации исходных данных во внешней среде.

Формальная модель и двухконтурная архитектура

Цифровой артефакт определяется как составной пакет компонентов: графических файлов, координатных таблиц, цифровых моделей, журналов измерений, пояснительных документов и манифеста, фиксирующего состав пакета, версии компонентов и параметры верификации. Перед хешированием каждый компонент приводится к воспроизводимой бинарной форме функцией канонизации, устраняющей незначимые технические вариации представления (порядок объектов, формат сериализации, кодировку). Хеш вычисляется отдельно для каждого компонента и манифеста; полученные значения конкатенируются в детерминированном порядке и хешируются повторно. Итоговый агрегированный хеш характеризует пакет как единое целое [22; 23].

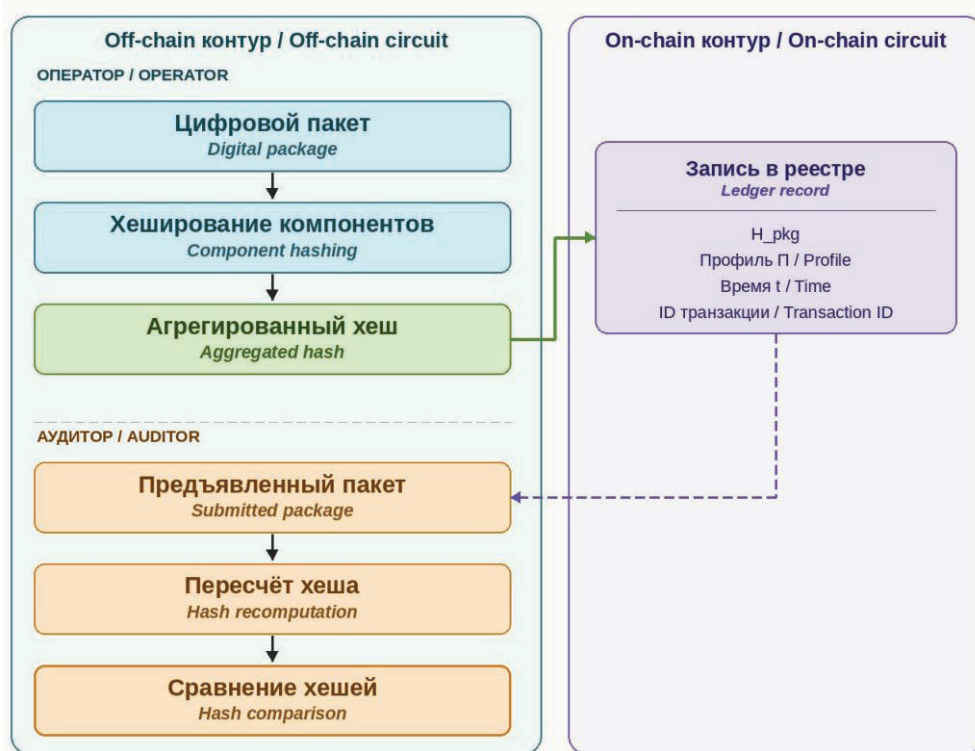


Рис. 1
Алгоритмы фиксации
и независимой проверки документа
или цифрового артефакта

Fig. 1
Algorithms for recording
and independent verification of a document or
a digital artifact



Таблица 1

Сопоставительная характеристика механизмов обеспечения целостности цифровой документации

Table 1

Comparative characteristics of mechanisms for ensuring the integrity of digital documentation

Механизм	Защита от подмены	Независимость проверки	Воспроизводимость во времени
Электронная подпись	Частично	Нет	Зависит от УЦ
Корпоративная СЭД с журналом	Нет	Нет	Зависит от оператора
Резервное копирование	Нет	Нет	Частично
Доверенная метка времени	Для файла	Да	Для файла
Двухконтурная фиксация	Для пакета	Да	Да

Архитектура построена как двухконтурная (рис. 1). Off-chain контур включает корпоративную систему документационного сопровождения, в которой выполняются операции жизненного цикла пакета, канонизация, вычисление хешей и формирование аудиторского файла, связывающего внутренний идентификатор пакета с идентификатором on-chain транзакции. On-chain контур образован внешним распределенным реестром, публикующим компактную запись фиксации: агрегированный хеш, идентификатор профиля канонизации, временную метку, тип артефакта [24]. Реестр не выполняет функций документохранилища; его роль ограничена обеспечением неподконтрольной оператору фиксации состояния. Модель доверия строится в предположении рационального оператора, способного к согласованным действиям внутреннего персонала по подмене данных задним числом; доверенными элементами выступают криптографические примитивы и реестр в части неизменяемости записей [25; 26].

Сценарий внешней верификации при надзорной проверке

При проведении проверки или расследования аудитор получает предъявленный недропользователем пакет, идентификатор on-chain записи и профиль канонизации [27]. Согласно алгоритму он независимо приводит компоненты к канонической форме, вычисляет агрегированный хеш и сопоставляет результат с записью реестра. Совпадение значений фиксирует криптографическую тождественность предъявленной версии состоянию, зарегистрированному в указанный момент, без подтверждения истинности содержания или установления юридического авторства [28; 29]. Расхождение ставит вопрос об источнике несоответствия: изменении компонента, подмене состава или некорректном применении профиля канонизации, локализуемом через поэлементные хеши манифеста с раскрытием содержания только измененного компонента. Наличие записи в реестре при невозможности предъявить пакет интерпретируется как утрата или сокрытие зафиксированного состояния и фиксируется как самостоятельное нарушение целостности архива [30; 31].

Модель угроз, границы применимости и положение в системе защиты

Архитектура противодействует трем классам угроз: постфактум-подмене содержания компонентов, обна-

руживаемой через расхождение элементных и агрегированного хешей; уничтожению или сокрытию пакета, обнаруживаемому по наличию записи в реестре при невозможности предъявить пакет; подмене состава без изменения отдельных компонентов, обнаруживаемой через включение манифеста в агрегированное значение [32; 33]. Сговор off-chain участников не позволяет изменить ранее опубликованное on-chain состояние. За пределами модели сознательно оставлены атаки на консенсус реестра, отказ в обслуживании и компрометация криптографических примитивов: эти угрозы относятся к безопасности базовой платформы, а не к рассматриваемому архитектурному приему [34; 35].

Предложенное решение не заменяет действующих механизмов целостности, а закрывает обнаружимый разрыв в их совокупном покрытии (табл. 1).

Заключение

Работа посвящена архитектурному обеспечению доказуемой постфактум-проверяемости цифровой документации при разработке месторождений открытым способом. Ключевое противоречие современного документооборота состоит в том, что цифровая документация в горной промышленности является доказательственным ресурсом контрольно-надзорного назначения, однако вся среда ее хранения сосредоточена во внутренней инфраструктуре оператора, чьи действия могут стать предметом внешней оценки; традиционные централизованные механизмы (электронная подпись, СЭД, журналы аудита, резервные копии) не устраняют это противоречие, оставаясь в пределах той же организационной среды. В качестве решения предложена двухконтурная архитектура, в которой исходные данные сохраняются во внутреннем off-chain контуре, а во внешний on-chain контур передается только компактное криптографическое представление состояния пакета документов. Формализована модель цифрового артефакта, объединяющая упорядоченные компоненты и манифест, описаны воспроизводимые алгоритмы фиксации и проверки, а на сценарии жизненного цикла плана развития горных работ показано обнаружение ретроспективной подмены, утраты и подмены состава пакета без раскрытия исходного содержания.

Научная значимость работы заключается в адаптации принципа blockchain anchoring к специфике документации горной отрасли с ее композитной структурой, длительным жизненным циклом и повышенными требованиями к кон-



фиденциальности. Практическая значимость заключается в возможности применения механизма в существующих процессах учета как надстройки над действующими системами без их замены. Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной оценкой архитектуры,

разработкой регламентированных профилей канонизации для типовых классов документов и анализом организационно-правовых условий, при которых результаты технической проверки могут использоваться в составе доказательственной базы.

Вклад авторов

Е.В. Логинов – разработка концепции исследования, экспертное сопровождение проведения исследования, написание и корректировка текста статьи.

С.С. Питерин – идея исследования, литературный обзор по теме исследования, проведение анализа, написание текста статьи.

Author's Contribution

Egor V. Loginov – development of the research concept, expert support of the research, writing and revision of the article text

Stanislav S. Piterin – research idea, literature review on the research topic, analysis, writing of the article text

Список литературы / References

1. Young A., Rogers P. A review of digital transformation in mining. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2019;36(4):683–699. <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00103-w>
2. Barnewold L., Lottermoser B.G. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(6):747–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.07.003>
3. Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
4. Князькин Е.А., Клебанов Д.А., Ювакаев Р.О. Разработка и применение новых методов оценки изменчивости качества полезных ископаемых на основе анализа больших данных для оперативного управления рудопотоком на горных предприятиях. *Записки Горного института*. 2025;275:145–154. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16586> (дата обращения: 11.04.2026).
Knyazkin E.A., Klebanov D.A., Yuvakaev R.O. New approaches to mineral quality variability evaluation using big data for operational control of ore flows in mining operations. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:145–154. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16586> (accessed: 11.04.2026).
5. Хохлов С.В. Применение методов цифрового моделирования для прогнозирования параметров развала взорванной горной массы. *Записки Горного института*. 2025;275:196–204. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (дата обращения: 11.04.2026).
Khokhlov S.V. Application of digital simulation methods for predicting parameters of blasted rock muckpile. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:196–204. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16650> (accessed: 11.04.2026).
6. Зиновьева О.М., Кузнецов Д.С., Меркулова А.М., Смирнова Н.А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):113–123. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>
Zinovieva O.M., Kuznetsov D.S., Merkulova A.M., Smirnova N.A. Digitalization of industrial safety management systems in mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):113–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-113-123>
7. Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю., Сапаров Р.Б., Искандяров Н.А., Кузиев Д.А. Повышение эффективности функционирования электротехнических систем угольных шахт. *Уголь*. 2026;(3):111–115. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202603111> (дата обращения: 07.04.2026).
Reshetnyak S.N., Reshetnyak M.Yu., Saparov R.B., Iskandarov N.A., Kuziev D.A. Enhancing the efficiency of electrical systems in coal mines. *Ugol'*. 2026;(3):111–115. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202603111> (accessed: 07.04.2026).



8. Бабкин Р.С., Кольвах К.А., Барабошкин И.А. Снижение выбросов оксидов азота при проведении массовых взрывов на открытых горных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(2):16–27. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_2_0_16
Babkin R.S., Kolvakh K.A., Baraboshkin I.A. Reduction in emission of nitrogen oxides in massive blasting in open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin. (In Russ.)* 2025;(2):16–27. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_2_0_16
9. Фомин С.И., Овсянников М.П. Обоснование оптимальных технико-экономических параметров карьера при этапной разработке рудных крутопадающих месторождений. *Записки Горного института*. 2026;277:157–166. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.73>
Fomin S.I., Ovsyannikov M.P. Substantiation of the optimal performance parameters for a quarry during the stage-wise development of steeply dipping ore deposits. *Journal of Mining Institute*. 2026;277:157–166. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.73>
10. Shabalov M.Yu., Zhukovskiy Yu.L., Buldysko A.D., Gil B., Starshaia V.V. The influence of technological changes in energy efficiency on the infrastructure deterioration in the energy sector. *Energy Reports*. 2021;7:2664–2680. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.05.001>
11. Crosby M., Nachiappan, Pattanayak P., Verma S., Kalyanaraman V. Blockchain technology: beyond bitcoin. *Applied Innovation Review*. 2016;(2):6–19. Available at: <https://scet.berkeley.edu/wp-content/uploads/AIR-2016-Blockchain.pdf> (accessed: 07.04.2026).
12. Casino F., Dasaklis T.K., Patsakis C. A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*. 2019;36:55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
13. Подкорытов Д.А. Блокчейн технологии. *Вестник магистратуры*. 2018;(4-3):41–42.
Podkorytov D.A. Blockchain technologies. *Vestnik Magistratury*. 2018;(4-3):41–42. (In Russ.)
14. Минбалеев А.В., Сафронов Е.Г. Правовая природа блокчейн. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Право*. 2018;18(2):94–97. <https://doi.org/10.14529/law180217>
Minbaleev A.V., Safronov E.G. The legal nature of blockchain. *Bulletin of the South Ural State University. Series Law*. 2018;18(2):94–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.14529/law180217>
15. Лиготский Д.Н., Долгушин Н.А. Анализ опыта применения беспилотных технологий при открытой разработке месторождений и перспективы их развития. *Горный журнал*. 2025;(2):42–47. <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.02.06>
Ligotsky D.N., Dolgushin N.A. Analysis of experience in the use of unmanned technologies in open pit mining and prospects for their development. *Gornyi Zhurnal*. 2025;(2):42–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2025.02.06>
16. Nevskaya M., Shabalova A., Nikolaichuk L., Kirsanova N. Development of a quantitative assessment algorithm for operational risks in mining engineering. *Resources*. 2025;14(4):53. <https://doi.org/10.3390/resources14040053>
17. Ботян Е.Ю., Николайчук Л.А., Мартемьянова А.Н., Степук Е.И., Пушкарев А.Е. Совершенствование подхода к организации технических ремонтов карьерных автосамосвалов при помощи систем удаленного мониторинга их узлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-2):137–152. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (дата обращения: 07.04.2026).
Botyan E.Y., Nikolaichuk L.A., Martemyanova A.N., Stepuk E.I., Pushkarev A.E. Improving the approach to the organization of technical repairs of dump trucks using remote monitoring systems of their nodes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-2):137–152. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2025/12-2/12-2_2025_137-152.pdf (accessed: 07.04.2026).
18. Команов П.А., Ревазов Х.Ю., Тавасиев Д.А. Исследование безопасности смарт-контрактов Ethereum. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021;(1-1):80–83. Режим доступа: <https://research-journal.org/archive/1-103-2021-january/issledovanie-bezopasnosti-smart-kontraktov-ethereum> (дата обращения: 07.04.2026).
Komanov P.A., Revazov H.Yu., Tavasiev D.A. A Security study of Ethereum smart contracts. *International Research Journal*. 2021;(1-1):80–83. (In Russ.) Available at: <https://research-journal.org/archive/1-103-2021-january/issledovanie-bezopasnosti-smart-kontraktov-ethereum> (accessed: 07.04.2026).
19. Алиев И.А. Уязвимости смарт-контрактов блокчейн-платформы Ethereum. *Научные записки молодых исследователей*. 2019;7(3):47–57. Режим доступа: <https://elib.fu.ru/art2019/bv1142.pdf/en/view> (дата обращения: 07.04.2026).
Aliev I.A. Vulnerabilities of the Ethereum blockchain smart contracts. *Scientific Notes of Young Scientists*. 2019;7(3):47–57. (In Russ.) Available at: <https://elib.fu.ru/art2019/bv1142.pdf/en/view> (accessed: 07.04.2026).
20. Loginov E.V., Masalskiy S.S., Petrov K.D., Zadorina D.S. Implementation of digital technologies at blending stockpiles in open pit mineral mining. *Eurasian Mining*. 2025;(2):93–97. <https://doi.org/10.17580/em.2025.02.17>
21. Haber S., Stornetta W.S. How to time-stamp a digital document. *Journal of Cryptology*. 1991;3(2):99–111. <https://doi.org/10.1007/BF00196791>
22. Gorman M.R., Dzombak D.A. A review of sustainable mining and resource management: Transitioning from the life cycle of the mine to the life cycle of the mineral. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018;137:281–291. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.001>
23. Malyshkov G.B., Sinkov L.S., Nikolaichuk L.A. Analysis of economic evaluation methods of environmental damage at calculation of production efficiency in mining industry. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017;12(10):2551–2554.
24. Yin J., Gong L., Wang S. Large-scale assessment of global green innovation research trends from 1981 to 2016: A bibliometric study. *Journal of Cleaner Production*. 2018;197:827–841. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.169>



25. Atzei N., Bartoletti M., Cimoli T. A Survey of attacks on Ethereum Smart Contracts (SoK). In: Maffei M., Ryan M. (eds) *Principles of Security and Trust: Proceedings of the 6th International Conference, POST 2017, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS 2017, Uppsala, Sweden, April 22–29, 2017*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2017, pp. 164–186. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54455-6_8
26. Ge X., Su S., Yu H., Chen G., Lu X. Smart mine construction based on knowledge engineering and internet of things. *International Journal of Performability Engineering*. 2018;14(5):1060–1068. <https://doi.org/10.23940/ijpe.18.05.p25.10601068>
27. Shushpanov I., Suslov K., Ilyushin P., Sidorov D.N. Towards the flexible distribution networks design using the reliability performance metric. *Energies*. 2021;14(19):6193. <https://doi.org/10.3390/en14196193>
28. Mohsenian-Rad A.-H., Wong V.W.S., Jatskevich J., Schober R., Leon-Garcia A. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010;1(3):320–331. <https://doi.org/10.1109/TSG.2010.2089069>
29. Andoni M., Robu V., Flynn D., Abram S., Geach D., Jenkins D. et al. Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;100:143–174. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.014>
30. Andrychowicz M., Dziembowski S., Malinowski D., Mazurek L. Secure multiparty computations on bitcoin. In: *2014 IEEE Symposium on Security and Privacy, Berkeley, May 18–21, 2014*. IEEE; 2014, pp. 443–458. <https://doi.org/10.1109/SP.2014.35>
31. Boneh D., Naor M. Timed Commitments. In: Bellare M. (ed.) *Advances in Cryptology – CRYPTO 2000: Proceedings of the 20th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, California, USA, August 20–24, 2000*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2000, pp. 236–254. https://doi.org/10.1007/3-540-44598-6_15
32. Jha A., Young A., Sattarvand J. Blockchain technology and mining industry: A review. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023;40(6):2269–2280. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00874-3>
33. Tahir I., Shahzad K., Ensari M.S. Utilising blockchain technology for managing natural resources: A case study of Reko Diq copper-gold project, Pakistan. *Resources Policy*. 2024;98:105341. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105341>
34. Жуковский Ю.Л., Семенюк А.В., Алиева Л.З., Арапова Е.Г. Цифровые платформы на основе блокчейн для снижения углеродного следа горных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(6-1):361–378. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_361
Zhukovskiy Y.L., Semenyuk A.V., Alieva L.Z., Arapova E.G. Blockchain-based digital platforms to reduce the carbon footprint of mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(6-1):361–378. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_61_0_361
35. Novikova O., Vladimirov I., Bugaeva T. Expansion of the fuel and energy balance structure in Russia through the development of a closed-loop recycling. *Sustainability*. 2021;13(9):4965. <https://doi.org/10.3390/su13094965>

Информация об авторах

Логинов Егор Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений открытым способом, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3965-0839>; e-mail: loginov_ev@pers.spmi.ru

Питерин Станислав Сергеевич – студент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Egor V. Loginov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3965-0839>; e-mail: loginov_ev@pers.spmi.ru

Stanislav S. Piterin – Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 11.08.2026

Article info

Received: 09.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 11.08.2026