НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 622.2:502.171
https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97

SCIENTIFIC ARTICLE
UDC 622.2:502.171

Особенности прогнозирования экологических последствий при проектировании экологически сбалансированной горнотехнической системы

Н. В. Гончар[1], С. В. Корнилков[2], И. А. Четверкин[3], В. А. Пикалов[4]✉

[1]Акционерное общество «Русская медная компания», г. Екатеринбург, Российская Федерация
[2]Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Российская Федерация
[3]Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственная фирма «Мониторинг месторождений полезных ископаемых», г. Екатеринбург, Российская Федерация
[4]Общество с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр – Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация
✉ *pikalov@ustup.ru*

Резюме. Приведены структура и последовательность геолого-структурного и гидрогеологического моделирования для прогнозирования гидрогеологических и геомеханических последствий при использовании хвостов обогащения для ликвидации горных выработок. Описан подход к созданию сопряженных геолого-структурных, геомеханических, гидрогеологических и гидрохимических моделей. Практическая значимость работы продемонстрирована на примере реализации объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез», где использование хвостов обогащения для закладки выработанного пространства угольного разреза позволило достичь нулевого сброса сточных вод, ликвидировать эндогенные пожары и обеспечить долгосрочную экологическую реабилитацию территории.

Ключевые слова: горнотехническая система, экологическая безопасность, жизненный цикл проекта, геолого-структурное моделирование, гидрогеологический прогноз, водный баланс, имплицитное моделирование, техногенные георесурсы, закладка выработанного пространства

Для цитирования: Гончар Н.В., Корнилков С.В., Четверкин И.А., Пикалов В.А. Особенности прогнозирования экологических последствий при проектировании экологически сбалансированной горнотехнической системы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2026; 26 (5): 90-97. https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97.

Features of environmental impact forecasting in designing an environmentally sustainable mining system

N. V. Gonchar[1], S. V. Kornilkov[2], I. A. Chetverkin[3], V. A. Pikalov[4]✉

[1]Russian Copper Company JSC, Ekaterinburg, Russian Federation
[2]Institute of Mining, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation
[3]"Monitoring of Mineral Deposits" Research and Production Firm LLC, Ekaterinburg, Russian Federation
[4]"Scientific and Technical Center – Geotechnology" LLC, Chelyabinsk, Russian Federation
✉ *pikalov@ustup.ru*

Abstract. The paper presents the structure and sequence of geological-structural and hydrogeological modeling to forecast hydrogeological and geomechanical consequences when using tailings for the liquidation of mine workings. An approach to creating coupled geological-structural, geomechanical, hydrogeological, and hydrochemical models is described. The practical significance of the research is demonstrated by the example of the integrated mining system "Tominsky GOK – Korkinsky Coal Mine", where the use of tailings to backfill the mined-out space of the open-pit coal mine achieved zero wastewater discharge, eliminated endogenous fires, and ensured long-term environmental rehabilitation of the area.

© Гончар Н. В., Корнилков С. В., Четверкин И. А., Пикалов В. А., 2026

Keywords: mining system, environmental safety, project life cycle, geological-structural modeling, hydrogeological forecasting, water balance, implicit modeling, anthropogenic georesources, backfilling of mined-out space

For citation: Gonchar N.V., Kornilkov S.V., Chetverkin I.A., Pikalov V.A. Features of environmental impact forecasting in designing an environmentally sustainable mining system. *Mine Surveying and Subsurface Use.* 2026; 26 (5): 90-97. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332-2026-26-5-90-97.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность находится на этапе структурной трансформации, обусловленной устойчивым ростом спроса на минеральное сырье, в первую очередь на медь и другие цветные металлы, в том числе необходимые для развития высоких технологий. Одновременно с этим горные компании вынуждены переходить к освоению медно-порфировых и других месторождений бедных руд, которые ранее считались нерентабельными из-за низкого содержания полезного компонента и многократно увеличивать объемы добычи и переработки руды [1, 2].

Следствием этого является возрастание энерго- и материалоемкости переработки, а также значительное увеличение нагрузки на окружающую среду, проявляющееся в росте объемов отходов недропользования и формировании устойчивых потоков загрязняющих веществ в атмосфере, почвенном покрове, поверхностных и подземных водотоках прилегающих к месторождению территорий. Поэтому традиционная линейная модель недропользования: **добыча – переработка – продукт и отход,** становится экологически и социально несостоятельной, а накопленный экологический ущерб, социальная напряженность на территории реализации проекта и ужесточение экологического законодательства требуют принципиально нового подхода к организации горного производства [3, 4].

Необходим переход к эффективному и экологически сбалансированному освоению природных и техногенных георесурсов, предусматривающему отношение к отходам как к источникам новых продуктов и возможностей.

Ключевым инструментом для обоснования такого перехода являются процессы интегрированного моделирования и прогнозирования, которые позволяют еще до начала реализации проекта спрогнозировать возможные технологические, технические и экологические риски и выбрать оптимальный, наиболее безопасный вариант реализации проекта, обеспечивая формирование во времени экологически сбалансированной горнотехнической системы (ЭС ГТС).

Цель исследований: обосновать структуру и последовательность геолого-структурного и гидрогеологического моделирования для прогнозирования гидрогеологических и геомеханических последствий при использовании хвостов обогащения для ликвидации горных выработок.

Методы исследований

Одним из основных направлений использования техногенных георесурсов и утилизации отходов горно-обогатительного производства является изготовление из хвостов обогащения закладочного материала и его использование для ликвидации горных выработок. Для исключения нежелательного изменения гидрогеологической ситуации, возникновения негативных геомеханических явлений, а также оценки экологических и геотехнических рисков необходимо предварительное геолого-структурное и гидрогеологическое моделирование [5–11] (рис. 1).



Рис. 1. **Состав и функции комплексного моделирования при проектировании экологически сбалансированных горнотехнических систем /**
Fig. 1. **Composition and functions of integrated modeling in the design of ecologically balanced mining systems**

Геолого-структурная модель представляет собой геометрическое описание литолого-геологических и структурно-тектонических характеристик выделенного участка земной коры, включающее пространственное расположение различных типов горных пород и структурных элементов массива (таких как складки, разломы, зоны дробления).

Создание геолого-структурной модели необходимо для увязки между собой в трехмерном пространстве имеющихся инженерно-геологических, геомеханических и гидрогеологических исходных данных. Формирование каркасных геолого-структурных моделей проводится в три последовательных этапа с использованием специализированного программного обеспечения.

На первом этапе выполняется формирование цифровой модели земной поверхности (ЦМП) и определение границ модели. Построение каркаса топоповерхности участка проводится по сети точек при помощи инструментов создания ЦМП. Границы моделирования определяются исходя из прогноза влияния горнодобывающего предприятия.

На втором этапе осуществляется создание каркасов, отражающих структурно-тектоническое строение участка. Структурно-тектонические тела (разломы, зоны дробления, складки) отстраиваются эксплицитным (явным) методом моделирования. Этот традиционный метод выполняется вручную. По предварительно оцифрованным геологическим разрезам сначала координатно фиксируются полигоны выделенных тел по сечениям. Полученные плоские полигоны сечений стандартными программными средствами последовательно объединяются друг с другом в каркас объемного тела.

На третьем этапе ведется создание каркасов литологических разностей. Создание оболочек литологических разностей проводится с использованием имплицитного (условного) метода моделирования. Это автоматизированный метод создания поверхностей литологических разностей на основе геологических данных (скважины, канавы, разрезы). Построение поверхностей производится на основе имеющихся известных точек данных для имплицирования неизвестных точек. Для интерполяции при условном моделировании используются радиально-базисные функции (РБФ). Функции РБФ используют полигармонический и тонкий пластинчатый сплайн.

На основании созданной модели поверхности, данных о структурно-тектоническом и литологическом строении выполняются прогнозные расчеты устойчивости бортов карьеров и модель положения бортов в разные временные промежутки. При необходимости корректируются углы погашения проектируемых бортов карьера с учетом вычисленных коэффициентов запаса устойчивости.

Наряду с классическими методами предельного равновесия, в современной практике активно развиваются подходы, основанные на применении нейросетевых моделей, позволяющих прогнозировать деформации массива по ограниченному набору геомеханических параметров с точностью, сопоставимой с численным моделированием [12].

Следующим обязательным элементом комплексного моделирования выступает **гидрогеологический прогноз** – оценка уровня, направления потока и качества подземных вод на всех стадиях жизненного цикла ЭС ГТС [13–15].

Для решения задач оценки защищенности водной среды при ликвидации горных выработок предложено использовать комплексный научный подход, основанный на создании гидрогеологической модели, включающей три взаимосвязанных компонента: модель водного стока, геофильтрационную модель, гидрохимическую модель (рис. 2).



Рис. 2. **Состав и функции комплексного гидрогеологического моделирования /**
Fig. 2. **Composition and functions of integrated hydrogeological modeling**

Модель водного стока показывает зависимость поверхностного и подземного стоков территории от метеорологических и геоморфологических факторов, а также дает оценку среднего и экстремального стока для разных сезонов. Данная модель строится на основе параллельных наблюдений за стоком рек и гидрометеорологическими факторами.

Далее решается общая система балансовых уравнений, которая состоит из уравнений баланса поверхностных вод, уравнений баланса подземных вод и уравнения речного стока.

Уравнение баланса поверхностных вод (1) записывается из условия, что в теплый период года динамические запасы поверхностных вод (далее – запасы) пополняются атмосферными осадками, а расходуются на поверхностный сток, испарение и питание подземных вод:

$$\Delta З_{пов} = А - П - С - И_{пов} = \\ = F \cdot A_{мм} - R_{п} \cdot З_{пов} - R_{с} \cdot З_{пов} - R_{ипов} \cdot З_{пов} \cdot T^{2}, \text{ тыс. м}^3, \quad (1)$$

где $\Delta З_{пов}$ – суточное изменение динамических запасов поверхностных вод;

А – суточное количество атмосферных осадков, тыс. м^3;

П – суточная величина питания подземных вод, тыс. м^3;

С – суточный поверхностный сток, тыс. м^3;

$И_{пов}$ – суточное испарение с поверхности земли, тыс. м^3;

F – площадь водосбора, тыс. м^2;

$A_{мм}$ – осадки, мм;

$R_п$ – суточная доля запасов, идущая на питание подземных вод, доли ед.;

$З_{пов}$ – суточные запасы поверхностных вод;

$R_с$ – суточная доля запасов, идущая на поверхностный сток, доли ед.;

$R_{ипов}$ – суточная доля запасов поверхностных вод, идущая на испарение при единичной температуре, доли ед.;

T – максимальная дневная температура воздуха, °С.

Мобильные запасы подземных пополняются за счет питания с поверхности земли, а расходуются на разгрузку в местные водотоки и испарение с уровня грунтовых вод.

Исходя из этого может быть записано следующее уравнение баланса подземных вод

$$\Delta З_{подз} = П - Р - И_{гр} = \\ = П - R_Р \cdot З_{подз} - R_{иподз} \cdot З_{пов} \cdot Т^2, \text{ тыс. м}^3; \quad (2)$$

где $\Delta З_{подз}$ – суточное изменение мобильных запасов подземных вод, тыс. м^3;

П – суточная величина питания подземных вод, тыс. м^3;

Р – суточная разгрузка подземных вод в водотоки, тыс. м^3;

$И_{гр}$ – суточное испарение с поверхности грунтовых вод, тыс. м^3;

$R_Р$ – суточная доля запасов, идущая на разгрузку, доли. ед.;

$R_{иподз}$ – суточная доля запасов подземных вод, идущая на испарение при единичной температуре, доли. ед.

Уравнение речного стока

$$РечСток = С + Р; \quad (3)$$

где РечСток – суточный речной сток, тыс. м^3;

С – суточный поверхностный сток, тыс. м^3;

Р – суточная разгрузка подземных вод в водотоки, тыс. м^3.

Для практических расчетов представленная общая система балансовых уравнений аппроксимируется конечно-разностными аналогами с суточным шагом по времени. Вместо дифференциалов используются конечные приращения (Δ). Учитывая столь малый временной шаг (1 сутки), можно утверждать, что принятая конечно-разностная аппроксимация исходных дифференциальных уравнений не вызовет сколь-либо существенных отклонений от точного решения.

Для решения данной системы балансовых уравнений необходимо получить значения обобщенных параметров ($R_с$, $R_п$, $R_{ипов}$, $R_Р$, $R_{иподз}$) для конкретного речного бассейна. В дальнейшем, имея значения этих параметров, возможно прогнозировать подземный, поверхностный и общий речной сток, а также динамические запасы подземных вод, имея всего лишь метеоданные по атмосферным осадкам и температуре воздуха.

В условиях ограниченного объема исходных данных и высокой пространственной неоднородности карьерных территорий перспективным направлением является применение гибридных моделей машинного обучения, сочетающих ансамблевые алгоритмы и нейронные сети. Подобные подходы позволяют учитывать нелинейные взаимосвязи между гидрогеологическими, геоморфологическими и техногенными факторами риска, обеспечивая снижение ошибки прогноза и повышение устойчивости расчетов при сокращении обучающей выборки [16].

Модель водного стока позволяет оценить интенсивность питания подземных вод. Эта информация нужна для создания геофильтрационной и гидрохимической моделей.

Геофильтрационная модель строится с применением алгоритмов конечно-разностных уравнений (часто с использованием отечественного программного обеспечения) на основе оценки фильтрационной неоднородности массива и емкостных характеристик горных пород. Она позволяет спрогнозировать депрессионную воронку и приток подземных вод по мере углубления карьера в условиях гидродинамического взаимодействия.

Гидрохимическая модель строится на основе изучения минерального состава пород, кинетики химических реакций и интенсивности поступления кислорода и воды в зону реакции. Ключевым элементом является натурное гидрохимическое моделирование взаимодействия горных пород с водой, воздухом и другими факторами. Это позволяет спрогнозировать химический состав воды в горной выработке, выявить риски выщелачивания тяжелых металлов и своевременно подобрать реагенты для нейтрализации или седиментации загрязняющих веществ.

Дополнительным элементом комплексного моделирования могут служить математические модели переноса газообразных и пылевых выбросов в подземных и открытых горных выработках, позволяющие прогнозировать концентрацию загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и почвенном покрове с учетом динамики газообмена и технологических параметров добычи.

Обсуждение результатов

Описанный выше комплекс моделей был успешно апробирован при реализации проекта, в полной мере отвечающего признакам экологической сбалансированности, – объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез» в Челябинской области.

Ликвидация Коркинского разреза ведется с использованием закладочного материала, приготовленного на основе хвостов обогащения медных руд Томинского месторождения [17, 18].

В состав закладочного материала входят преимущественно малорастворимые минеральные фазы, при этом многократное измельчение в мельницах обеспечивает получение частиц, размер которых сопоставим с глинистыми. Гранулометрический состав пульпы, подаваемой в выработанное пространство, в точке ее разгрузки характеризуется следующим распределением фракций по массе: песок (0,05–2 мм) – 26,3–35,1 %; пыль (0,05–0,002) – 51,1–59,4 %; фракция <0,002 мм – 13,5–17,1 %. Влажность исследуемого образца техногенной пульпы составила 30,5 %. С применением методики ЯМР-релаксации Р. Э. Дашко и соавторов проведено исследование водонасыщенного образца, в минеральном составе которого установлены следующие компоненты: кварц (SiO_2) – 40 %; альбит ($Na[AlSi_3O_8]$) – 32 %; клинохлор ($(Mg,Al)_6[Si_3, _{1\text{-}2}Al_{0,9\text{-}1,2}O_{10}](OH)_8$ – 20 %; карбонаты – 3 %; биотит ($K(Mg,Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH,F]_2$) – 3 %; пирит ($FeS_2$) – менее 1 %; рутил ($TiO_2$) – около 1 %.

Из приведенного минерального состава следует, что типичные глинистые минералы в исследуемой пульпе отсутствуют. Формирование тонкодисперсной фракции

(<0,002 мм), вероятнее всего, обусловлено механическим разрушением алюмосиликатов, присутствующих в исходной руде, при их помоле в шаровых мельницах – главным образом, клинохлора (20 % состава) и, в меньшей степени, биотита (3 %). Проведенные эксперименты показали, что время спин-решеточной релаксации T_1 для данного образца пульпы равно $3{,}7 \cdot 10^{-2}$ с, что превышает аналогичный параметр глинистых грунтов на порядок ($T_1 = n \cdot 10^{-3}$ c). Более высокая водоотдача подобных грунтов подтверждается объемом воды, накапливающейся в разрезе по мере заполнения его закладочным материалом (рис. 3).

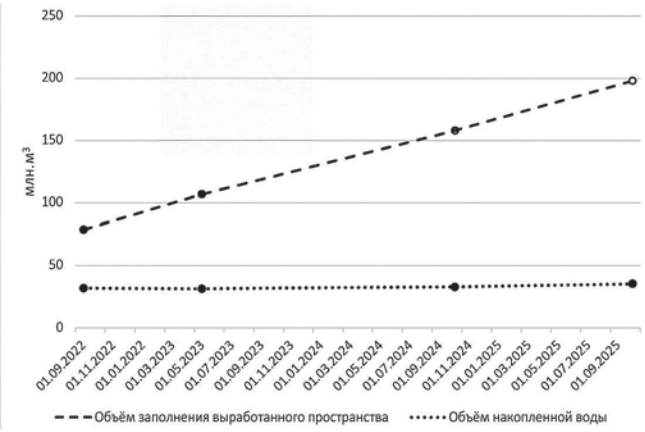


Рис. 3. **Динамика заполнения выработанного пространства закладочным материалом и формирование водного объема /**
Fig. 3. **Dynamics of backfilling mined-out space and water volume formation**

На начальном этапе проектирования были привлечены ведущие научные и проектно-изыскательские организации, которыми проведено моделирование и прогнозирование экологической и геомеханической ситуации с учетом реализации данного проекта.

Специалистами-гидрогеологами научно-производственной фирмы «Мониторинг месторождений полезных ископаемых» (г. Екатеринбург) выполнены анализ существующих гидрогеологических условий и моделирование их изменения при ликвидации Коркинского разреза, в том числе подготовлена геофильтрационная модель района разреза, прогноз гидродинамических последствий ликвидации карьерной выемки, а также прогноз химического состава воды в Коркинском разрезе при его закладке.

Ключевым результатом гидрогеологического моделирования стало доказательство того, что благодаря преобладанию испарения над атмосферными осадками, вокруг разреза как минимум в ближайшие 300 лет будет устойчиво сохраняться депрессионная воронка. Это исключает как вероятность поступления воды из разреза в подземные горизонты, так и подтопление города Коркино, расположенного на борту разреза. При этом химический состав воды в формирующемся водоеме прогнозируется более благоприятным по сравнению с вариантом естественного затопления.

С 2021 году специалистами ООО «Уралгеопроект» проводится систематический отбор проб жидкой фазы закладочного материала по вертикальным профилям, при этом число проб варьируется от 3 до 14 в зависимости от конкретного периода наблюдений. Для мониторинга были отобраны именно те гидрохимические показатели, которые на этапе первичного опробования превышали предельно допустимые концентрации, установленные СанПиН 2.1.3685-21.

Усредненные результаты проведенных исследований представлены на рисунке 4.

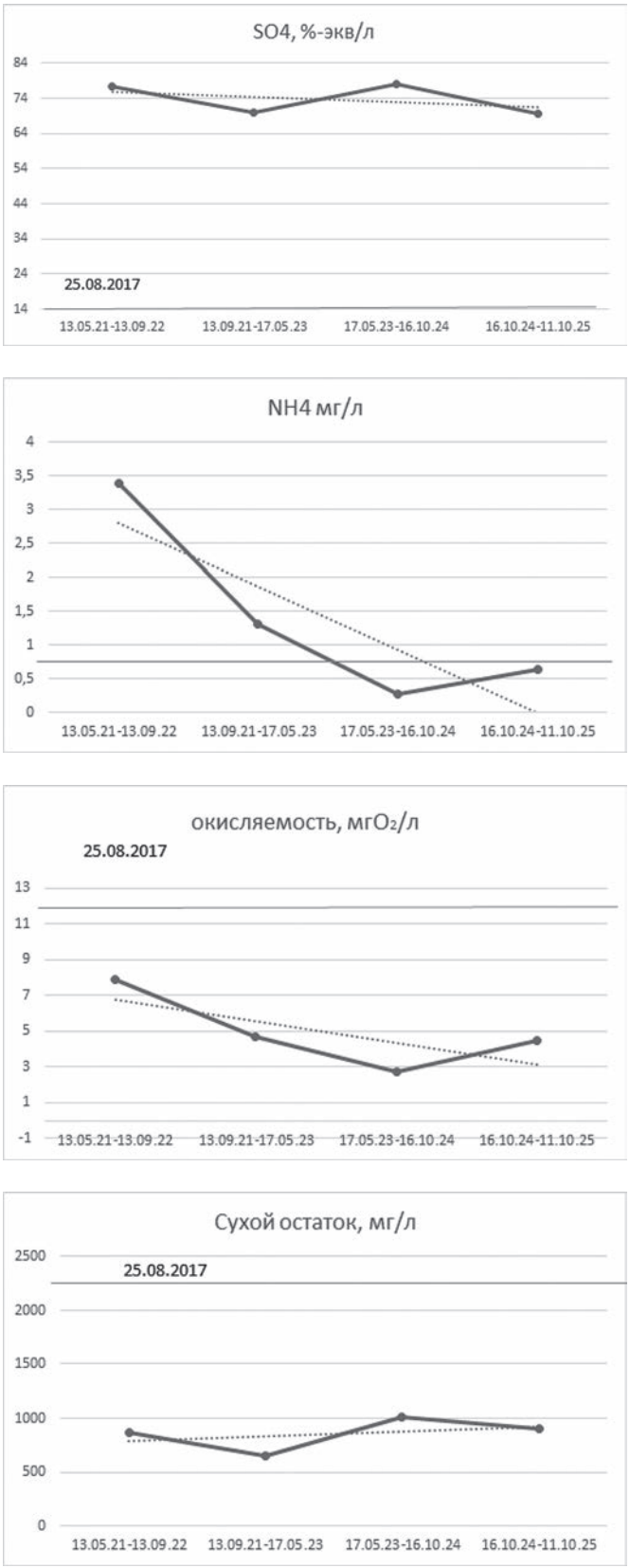


Рис. 4. **Динамика гидрохимических показателей воды, превышавших предельно допустимые концентрации по СанПиН 2.1.3685-21 /**
Fig. 4. **Dynamics of hydrochemical water parameters exceeding MAC under SanPiN 2.1.3685-21**

Отмечено, что относительная доля сульфат-ионов в анионном составе воды возросла, однако их абсолютная концентрация снизилась: если в 2017 году содержание сульфатов составляло 768 мг/л, то усредненное значение за 2025 год сократилось до 327,33 мг/л.

На современном этапе жидкая фаза закладочного материала характеризуется хлоридно-сульфатным типом минерализации, относится к категории пресных вод с величиной сухого остатка 0,89 г/л и имеет щелочную реакцию среды с pH 8,49 (для сравнения: в 2017 году значение pH составляло 9,0).

Таким образом, на протяжении восьмилетнего периода заполнения выработанного пространства разреза ухудшения качества воды в формирующемся техногенном водоеме не зафиксировано, что свидетельствует о достоверности выполненных ранее прогнозных оценок. Заполнение карьерной выемки закладочным материалом обеспечивает одновременно несколько положительных эффектов: подавление очагов эндогенного горения в угольных породах, повышение устойчивости бортов вследствие пригрузки их нижней части твердой фазой закладки, а также рост щелочности воды в техногенном водоеме, что приводит к снижению миграционной активности соединений тяжелых металлов.

Уральским филиалом Научно-исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевым научным центром ВНИМИ проведена научно-исследовательская работа по геомеханической оценке фактического состояния бортов разреза «Коркинский» и прилегающей территории, а также прогнозная оценка влияния проектных решений по ликвидации разреза на устойчивость его бортов. По результатам прогноза сделаны выводы об обеспечении устойчивости бортов разреза и рекомендации по порядку его ликвидации.

Специалистами Санкт-Петербургского горного университета дана оценка технологической возможности и экологической безопасности реализации проекта. В настоящее время сотрудниками университета ведется научное сопровождение и регулярный контроль выполнения работ по ликвидации, в том числе геомеханический и деформационный контроль бортов разреза и прибортового массива, а также оценка экологического состояния природной среды в районе ликвидируемой горной выработки.

Заключение

1. Обоснована необходимость создания сопряженных геолого-структурных, геомеханических, гидрогеологических и гидрохимических моделей. Особую роль играет применение имплицитных методов моделирования литологических разностей на основе радиально-базисных функций (РБФ), обеспечивающих высокую точность даже при неравномерной сети скважин.

2. Представлен математический аппарат оценки водного баланса через систему балансовых уравнений, аппроксимированную конечно-разностными аналогами с суточным шагом. Такой подход позволяет прогнозировать динамику запасов подземных вод и интенсивность их питания на основе доступных метеоданных.

3. Практическая значимость подхода подтверждена на примере объединенной горнотехнической системы «Томинский ГОК – Коркинский разрез», где использование хвостов обогащения для закладки выработанного пространства угольного разреза позволило достичь нулевого сброса сточных вод, ликвидировать эндогенные пожары, обеспечить устойчивость бортов и долгосрочную экологическую реабилитацию территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Трубецкой К.Н., Корнилков С.В., Яковлев В.Л. О новых подходах к обеспечению устойчивого развития горного производства. *Горный журнал*. 2012; (1): 15-19.
   Trubetskoy K.N., Kornilkov S.V., Yakovlev V.L. On new approaches to ensuring sustainable development of mining operations. *Mining Journal*. 2012; (1): 15-19. (In Russ.).
2. Шайлиева М.М., Кадыргулов Р.Р. Состояние и проблемы горнодобывающей промышленности. *Экономика*: *вчера*, *сегодня*, *завтра*. 2024; 14 (11А): 212-225. https://doi.org/10.34670/AR.2024.67.68.024.
   Shailieva M.M., Kadyrgulov R.R. State and problems of the mining industry. *Economics: Yesterday, Today, Tomorrow.* 2024; 14 (11A): 212-225. (In Russ.). https://doi.org/10.34670/AR.2024.67.68.024.
3. Федосеева С.С. Устойчивое развитие экономики промышленного комплекса: экологическое измерение и экосистемные эффекты. Отв. ред. А.А. Урасова. Екатеринбург, 2025: 212.
   Fedoseeva S.S. Sustainable Economic Development of the Industrial Complex: Environmental Dimension and Ecosystem Effects. Ed. by A. A. Urasova. Yekaterinburg, 2025. (In Russ.).
4. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Развитие теоретических основ проектирования горнотехнических систем для их устойчивого долговременного функционирования. *50 лет российской научной школе комплексного освоения недр Земли: мат-лы Межд. науч.-практ. конф.* Москва, 2017: 345-350.
   Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Development of theoretical foundations for designing mining systems for their sustainable long-term operation. *50 Years of the Russian Scientific School of Integrated Development of Earth Subsurface: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference.* Moscow, 2017: 345-350. (In Russ.).
5. Юдаев И.В., Сангаджиева С.А., Гермашева Ю.С. и др. Моделирование потоков загрязняющих веществ при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. *Известия ТулГУ*. *Науки о Земле*. 2025; 4: 68-73.
   Yudaev I.V., Sangadzhieva S.A., Germasheva Yu.S., et al. Modeling pollutant flows during open-pit mining of mineral deposits. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 68-73. (In Russ.).
6. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Левихинского рудника, Средний Урал). *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020; 3-1: 488-500. https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.
   Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Issues of hydrosphere self-rehabilitation and mine water treatment at the post-operational stage (on the example of Levikhinsky mine, Middle Urals). *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2020; (3-1): 488-500. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.

7. Корнилков С.В., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Об основных направлениях взаимодополнения методов цифровизации и геоинформационного обеспечения горного производства. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2025; 67 (1): 76-85. https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.
Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Main directions of complementarity between digitalization methods and geoinformation support for mining production. *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration.* 2025; 67 (1): 76-85. (In Russ.). https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85.
8. Киреева Г.И. Нейросетевое моделирование деформаций горных выработок в условиях ограниченных данных. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; (3): 200-205.
Kireeva G.I. Neural network modeling of mine working deformations under conditions of limited data. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (3): 200-205. (In Russ.).
9. Качурин Н.М., Воробьев С.А., Факторович В.В. Теоретические положения и модели воздействия на окружающую среду подземной добычи полезных ископаемых. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2013; (3): 3-17.
Kachurin N.M., Vorobiev S.A., Faktorovich V.V. Theoretical principles and models of environmental impact of underground mineral mining. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2013; (3): 3-17. (In Russ.).
10. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Пономаренко М.Р. и др. Геомеханический мониторинг устойчивости бортов разрезов и отвалов при разработке угольных месторождений. *Горный журнал*. 2023; (5): 69-74. https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.10.
Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Ponomarenko M.R., et al. Geomechanical monitoring of pit wall and dump stability in coal deposit development. *Mining Journal.* 2023; (5): 69-74. (In Russ.). https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.10.
11. Назарова Л.Р. Прогнозирование геоэкологических параметров горнодобывающих объектов с применением статистических и нейросетевых методов. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; 4: 119-124.
Nazarova L.R. Forecasting geoecological parameters of mining facilities using statistical and neural network methods. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 119-124. (In Russ.).
12. Кукарцев В.В., Прудкий А.С., Никаноров М.С. и др. Прогнозирование геоэкологических рисков карьерных территорий на основе гибридной модели машинного обучения. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2025; (4): 80-85.
Kukartsev V.V., Prudky A.S., Nikanorov M.S., et al. Forecasting geoecological risks of quarry areas based on a hybrid machine learning model. *News of the Tula State University. Sciences of Earth.* 2025; (4): 80-85. (In Russ.).
13. Aghdamigargari M., Avane S., Anani A., et al. Sustainability in Long-Term Surface Mine Planning: A Systematic Review of Operations Research Applications. *Sustainability*. 2024; 16 (22): 9769. https://doi.org/10.3390/su16229769.
14. Гончар Н.В., Четверкин И.А., Вишняк А.И. и др. Оценка защищенности водной среды при разработке крупных месторождений медно-порфировых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; (12-2): 16-26. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.
Gonchar N.V., Chetverkin I.A., Vishnyak A.I., et al. Assessment of aquatic environment protection in the development of large porphyry copper ore deposits. *Mining Informational and Analytical Bulletin.* 2023; (12-2): 16-26. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.
15. Bond A., Retief F.P., Alberts R.C., et al. What would environmental impact assessment look like if we started from scratch today? Designing better EIA for developed neoliberal nations. *Impact Assessment and Project Appraisal*. 2024; 42 (5): 410-422. https://doi.org/10.1080/14615517.2024.2426117.
16. Anderson M.P., Woessner W.W., Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015: 564.
17. Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С. и др. Технологические особенности ликвидации разреза «Коркинский». *Уголь*. 2018; 3 (1104): 91-95. https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-91-95.
Sokolovsky A.V., Lapaev V.N., Temnikova M.S., et al. Technological features of decommissioning the Korkinsky open-pit coal mine. *Coal.* 2018; 3 (1104): 91-95. (In Russ.). https://doi.org/10.18796/0041-5790-2018-3-91-95.
18. Penman J., Sanders J. Integration of 'safe closure' into the selection of a new tailings storage facility. *Mine Closure 2025*: *Proceedings*. Australian Centre for Geomechanics, 2025. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2515_69.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Наталия Валерьевна Гончар –
канд. техн. наук, вице-президент по инжинирингу и экологической безопасности, АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: info@rcc-group.ru

Сергей Викторович Корнилков –
д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН), г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Игорь Афанасьевич Четверкин –
директор, ООО «НПФ «Мониторинг месторождений полезных ископаемых», г. Екатеринбург, Российская Федерация; e-mail: npf_mmpi@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Natalia V. Gonchar –
Cand. Sci. (Eng.), Vice President for Engineering and Environmental Safety, Russian Copper Company JSC, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: info@rcc-group.ru

Sergey V. Kornilkov –
Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IM UB RAS), Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: kornilkov@igduran.ru

Igor A. Chetverkin –
Director, "Monitoring of Mineral Deposits" Research and Production Firm LLC, Ekaterinburg, Russian Federation; e-mail: npf_mmpi@mail.ru

Вячеслав Анатольевич Пикалов –
начальник отдела, ООО «Научно-технический центр – Геотехнология», г. Челябинск, Российская Федерация: e-mail: pikalov@ustup.ru

Критерии авторства:
Н. В. Гончар – идея и методология исследований, формулировка новых фактов; С. В. Корнилков – постановка задачи, руководство исследованием; И. А. Четверкин – формулировка новых фактов, анализ результатов; В. А. Пикалов – анализ результатов; научное редактирование.

Конфликт интересов:
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 04.08.2026
Поступила после рецензирования: 21.09.2026
Принята к публикации: 27.09.2026

Vyacheslav A. Pikalov *–*
Head of Department, "Scientific and Technical Center – Geotechnology" LLC, Chelyabinsk, Russian Federation; e-mail: pikalov@ustup.ru

Contribution:
N. V. Gonchar – research concept and methodology, formulation of new facts; S. V. Kornilkov – problem statement, research supervision; I. A. Chetverkin – formulation of new facts, data analysis; V. A. Pikalov – data analysis, scientific editing.

Conflict of interest:
The authors declare no conflict of interest.

Article info
Received: 04.08.2026
Revised: 21.09.2026
Accepted: 27.09.2026