



## ОБ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ВЗАИМОДОПОЛНЕНИЯ МЕТОДОВ ЦИФРОВИЗАЦИИ И ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.В. КОРНИЛКОВ, П.А. РЫБНИКОВ, Л.С. РЫБНИКОВА\*

*Институт горного дела УрО РАН  
58, ул. Мамина-Сибиряка, г. Екатеринбург 620075, Россия*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Использование цифровых двойников, созданных на основе комбинирования компьютерных моделей и геоинформационных систем, позволяет всесторонне описать ситуации, складывающиеся при ведении горных работ, и обоснованно принимать управляющие решения, обеспечивающие безопасное и эффективное управление горным производством.

**Цель.** Обоснование подходов к созданию цифровых двойников горного производства, которые сопровождают горнодобывающие работы.

**Методика (методология)** проведения исследований включала литературный поиск и анализ, обобщение опыта построения цифровых двойников протекания опасных процессов для прогноза развития газодинамических явлений, управления качеством руд и процессами проведения буровзрывных работ, обоснования гидрогеохимического мониторинга и интерпретация его результатов за многолетний период с использованием численной гидрогеологической модели.

**Результаты и их анализ.** На примере использования численной гидрогеологической модели в составе цифрового двойника показано, что анализ результатов мониторинга и данных цифрового моделирования позволяет на каждом этапе отработки карьера в условиях многофакторной многокомпонентной ситуации подтверждать обоснованность принятых проектных решений и свидетельствует об эффективности и перспективности использования предлагаемого подхода к управлению сложной горнотехнической системой.

**Выводы и область применения результатов.** Комплексное использование цифровых двойников и данных геоинформационного мониторинга опасных явлений и процессов позволяет повысить эффективность горного производства на базе анализа моделей развития (реабилитации) оцениваемых явлений.

**Ключевые слова:** горнотехническая система, опасные процессы, цифровизация, управление, информационная копия

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке Государственного задания ИГД УрО РАН. Тема 2 (2025—2027 гг.) «Геоинформационное обеспечение системной оценки стратегий природосбережения при освоении ресурсов недр» (FUWE-2025-0002). Гр. № 1022040300092-1-1.5.1.

**Для цитирования:** 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> EDN: [LXMXGF](#)

*Статья поступила в редакцию 18.09.2024*

*Принята к публикации 11.03.2025*

*Опубликована 31.03.2025*

\* Автор, ответственный за переписку

## MAIN DIRECTIONS IN COMBINING DIGITIZATION AND GEOINFORMATION METHODS FOR SUPPORTING MINING PRODUCTION

SERGEY V. KORNILKOV, PETR A. RYBNIKOV, LIUDMILA S. RYBNIKOVA\*

*Institute of Mining of the Ural Branch of the RAS  
58, Mamin-Sibiriyak str., Yekaterinburg 620075, Russia*

### ABSTRACT

**Background.** The use of digital twins, created by combining digital models and geoinformation systems, enables a comprehensive description of situations that arise during mining operations. This facilitates informed management decisions and ensures safe and efficient management of mining operations.

**Aim.** Justification of approaches to the creation of digital twins of mining production, which accompany mining operations.

**Methods.** A literature search and review; generalization of the accumulated experience in constructing digital twins of hazardous processes to predict the development of gas dynamic phenomena; control over ore quality and drilling and blasting processes; substantiation of hydrogeochemical monitoring and interpretation of its results over prolonged periods using numerical hydrogeomigratory model.

**Results and discussion.** The application of a numerical hydrogeological model as a digital twin confirmed the feasibility of analyzing the results of monitoring and digital modeling for supporting decision making at each stage of quarry development under the action of various factors. The results obtained indicate the prospects of the proposed approach to managing complex hydrogeological and mining systems.

**Conclusion.** The combined use of digital twins and geoinformation monitoring data on hazardous phenomena and processes and their further analysis contributes to increasing the efficiency of mining production.

**Keywords:** mining and technological system, hazardous process, digitalization, management, digital twin

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Financial disclosure:** The work was carried out with the support of the State Assignment of the IGD Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Topic 2 (2025-2027) “Geoinformation support for the systematic assessment of environmental conservation strategies in the development of subsurface resources” (FUWE-2025-0002). Issued No. 1022040300092-1-1.5.1.

**For citation:** Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Main directions in combining digitization and geoinformation methods for supporting mining production. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2025;67(1):76—85. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85> EDN: [LXMXGF](https://doi.org/10.32454/0016-7762-2025-67-1-76-85)

*Manuscript received 18 September 2024*

*Accepted 11 March 2025*

*Published 31 March 2025*

\* Corresponding author

Объединяя различные математические и компьютерные модели в единую систему, можно получить новую сущность — цифровой двойник, которая позволяет всесторонне описать изделие и системно подойти к разработке, производству

и эксплуатации изделий. Применение цифровых двойников изделий в промышленности является развитием парадигмы компьютерного моделирования и цифрового инжиниринга изделий<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения.

Развитие цифровизации производства реализуется по 4 основным направлениям<sup>2,3</sup>:

- роботизированная автоматизация процессов (RPA), организация и контроль трудовых и производственных процессов;
- интеллектуальная автоматизация с привлечением искусственного интеллекта, сокращение монотонного физического труда;
- углубленная аналитика и большие данные (Deep Learning and Big Data);
- новые средства бизнес-моделирования, имитационное моделирование (Simulation modelling), обеспечение безопасности работ и работающих.

Цифровой двойник представляет собой цифровую копию физического объекта или производственного процесса для оптимизации бизнес-процессов или повышения их эффективности. Применение цифровых двойников промышленных объектов позволяет:

- выбрать наиболее оптимальные режимы работы;
- поставить виртуальные эксперименты, которые в реальности могут быть сопряжены с риском;
- установить степень износа и вероятность выхода из строя узлов объекта по данным датчиков;
- создать информационные копии сложных объектов;
- создать двойники предприятий со всеми производственными и логистическими процессами.

Геоинформационный мониторинг опасных явлений и процессов основывается на четырех основных составляющих [5, 10, 11, 13]:

- собственно мониторинг опасного явления с получением данных об объекте в динамике его развития;
- изучение механизма зарождения и развития опасного процесса с поиском эмерджентных свойств исследуемой системы и формированием системных ограничений (индикаторов), контролируемых в процессе мониторинга;
- цифровое или аналитическое моделирование с целью изучения свойств и параметров изучаемых объектов природно-технологического комплекса;
- прогноз опасных процессов на базе анализа построенных геоинформационных моделей развития (реабилитации) оцениваемых явлений.

В качестве примеров в таблице приведены:

- *прогноз развития опасных газодинамических явлений, реализованный в виде схемы информационных потоков* [1, 7]. Данные о текущем содержании метана в рудничной атмосфере *в режиме*

*он-лайн* поступают от соответствующих газоанализаторов. Прогнозные геоинформационные данные о нарушенности угольного пласта на удалении до 60—80 м от очистного забоя поступают от датчиков, фиксирующих прохождение сейсмических волн, индуцируемых работой угольного комбайна. Предложенная методика расчета показателя опасности возникновения газодинамического явления служит основой для обоснования индикаторов сверхнормативного выброса метана. Заверка осуществляется стандартными методами контроля газообильности пласта и его дегазации;

- *цифровизация управления качеством руд* [2, 4, 6], реализованная в виде логистической схемы взаимодействия совокупности накопительных элементов, включающих экскаваторные забои, усреднительные склады, склады некондиционного сырья, резервные бункеры, участвующие в доставке руды из карьера на обогатительную фабрику в течение месяца, объединенные соответствующими транспортными потоками. В указанной логистической системе данные об отгрузке и переработке рудной массы *являются дискретными*, зависящими от способа накопления сырья и текущих методов контроля его качества. Заверка качества произведенной продукции осуществляется с разным по времени интервалом;

- *цифровизация управления процессами БВР* [3, 8, 12, 14], основанная на дискретных данных магнитного каротажа скважин и электропроницаемости массива, опробования бурового шлама, данных энергоемкости бурения пород по глубине взрывной скважины с целью прогноза свойств локальных массивов, распределения крупности и качества горной массы в целике и в развале, удельного расхода ВВ, и в связи с этим прогноза безопасного действия УВВ и сейсмического действия взрыва, разлета отдельных кусков горной массы;

- *цифровизация процессов гидрогеохимического мониторинга* [9, 15, 16] предусматривает высокоточные полевые измерения параметров поверхностных и подземных вод с периодическим отбором проб в точках контроля для прогноза миграции загрязняющих компонентов, оперативного анализа формирования и трансформации химического состава кислых шахтных вод, изменения гидрохимической и гидрологической обстановки.

Представленные в таблице сопоставительные данные свидетельствуют о том, что:

<sup>2</sup> ГОСТ Р 57700.22-2020. Компьютерные модели и моделирование. Классификация.

<sup>3</sup> ГОСТ Р 57412-2017. Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения.

Таблица. Основные параметры формируемых цифровых двойников протекания опасных процессов  
 Table. Main parameters of the generated doubles of the hazardous processes

Параметры формирования цифровых двойников	Наименование бизнес-процесса			
	Прогноз развития опасных газодинамических явлений	Цифровизация управления качеством руд	Цифровизация управления процессами БВР	Цифровизация процессов гидрогеохимического мониторинга
Периодичность получения данных	Онлайн	Часы	Часы-недели до нескольких лет	Недели-месяцы — до нескольких лет
Источники данных	Управление и оперирование потоками параметрических данных в координатном пространстве горного массива	Опробование в забоях, на перегрузочных пунктах, в транспортных средствах, при обогащении	Данные бурения, опробование керна, карты качества взорванной горной массы	Высокоточные полевые измерения параметров поверхностных и подземных вод
Конечные датчики	Газоанализаторы, сейсмодатчики	Каротаж скважин, опробование бурового шлама, забойное опробование, контроль готовой продукции и хвостов	Каротаж скважин, опробование бурового шлама, данные энергоёмкости бурения	Отбор проб в точках контроля, определение показателей окислительно-восстановительных условий района ведения работ
Модель процесса	Рейтинговая модель прогноза геогазодинамического состояния горного массива в процессах подземной разработки угольных месторождений	Цифровая модель совокупности запасов и их качества на буровых блоках, в забоях, на складах, на колесах, в бункерах	Модель и качество горной массы в целике, в развале, прогноз распределения крупности, распространения ударной воздушной волны, сейсмического действия, разлета осколков	ГИС оперативного анализа формирования и трансформации химического состава кислых шахтных вод, изменения гидрохимической и гидрологической обстановки
Компенсация колеблемости	Упреждающие технические действия по дегазации пласта. Вывод людей из опасной зоны	Накопительные и усреднительные емкости, интенсивность перемещения отдельных логистических потоков	Корректировочные расчеты, моделирование перемещения горной массы взрывом, прогноз качества разрушения	Гидрогеомиграционное моделирование, оценка балансовых составляющих потоков, расчеты форм миграции загрязняющих компонентов

• геоинформационные модели — это база для организации мониторинга контролируемых опасных процессов горного производства. Цифровизация и создание двойников является дальнейшим развитием методики прогноза по данным мониторинга;

• исходя из специфики процессов, возникающих при ведении горных работ, следует иметь в виду, что их протекание характеризуется значительным разбросом по времени, а организация непрерывного цифрового контроля представляет в большинстве своем значительную сложность, и зачастую оценка модели состояния объекта будет

осуществляться дискретно, по мере поступления текущих данных об объекте;

• основное требование к цифровым двойникам: онлайн-режим поступления и пополнения данных, наличие конечных датчиков, обеспечивающих мониторинг, анализ и принятие решений в режиме реального времени — на практике не всегда выполнимо, однако может быть компенсировано использованием данных геоинформационного моделирования.

Поэтому привязка во времени и пространстве, основанная на геоинформационной обработке геомеханических и горнотехнических

параметров геосистем, переноса и распространения загрязнений и пр., является актуальной как для разработки горно-геологических информационных систем (ГГИС), так и для создания цифровых двойников.

В методике создания цифровых двойников на первых же этапах необходимо в обязательном порядке обосновать, каким горным предприятиям функционально необходимо использовать ГГИС, комплексный мониторинг или 3D цифровые двойники. Это прежде всего определяется масштабами производства, сложностью горно-геологических условий и технологической сложностью производства. При введении новых подходов к управлению производством необходимо предусматривать некие переходные процессы, обеспечивающие поэтапный переход к цифровизации бизнес-процессов.

Немаловажным фактором является прогноз степени защищенности горно-промышленных территорий в связи с ведением хозяйственной деятельности, имея в виду, что защищенность — это способность природно-технологической системы восстанавливать свои свойства в результате воздействия на нее внешних или внутренних природных, технологических или экономических факторов. Степень защищенности системы может быть охарактеризована индикаторами, превышение которых разрушает или изменяет свойства системы. Поэтому такие оценки рекомендуется осуществлять по данным геоинформационного мониторинга, а изучение основных факторов, влияющих

на протекание бизнес-процессов, осуществлять на базе цифровых двойников.

Эффективность создания такого вида цифровых двойников для управления гидрогеологической составляющей горнотехнической системы может быть проиллюстрирована на примере Ново-Сухоложского карьера аргиллитов, расположенного в непосредственной близости от законсервированных свалок твердых и жидких отходов.

Необходимость создания цифрового двойника связана с вероятностью подтягивания загрязнения от свалок при работе карьерного водоотлива. Для этого используется численное геофильтрационное и гидрогеомиграционное моделирование — решение систем уравнений в частных производных, описывающих движение воды в горных породах и перенос загрязнений, методами конечных разностей или конечных элементов.

Основной задачей организованного мониторинга является оценка и прогноз изменений в состоянии компонентов природной среды при реализации проектных решений по отработке карьера и разработка рекомендаций по предотвращению возможных негативных воздействий на окружающую среду (рис. 1). Для этого создана проектная геоинформационная модель, характеризующая общий порядок поэтапного развития работ с выделением 4 этапов. Границы этапов выделены исходя из условий ведения работ в имеющемся земельном отводе и перенесения на более поздние сроки отработки участков, непосредственно примыкающих к зоне рекультивированной городской

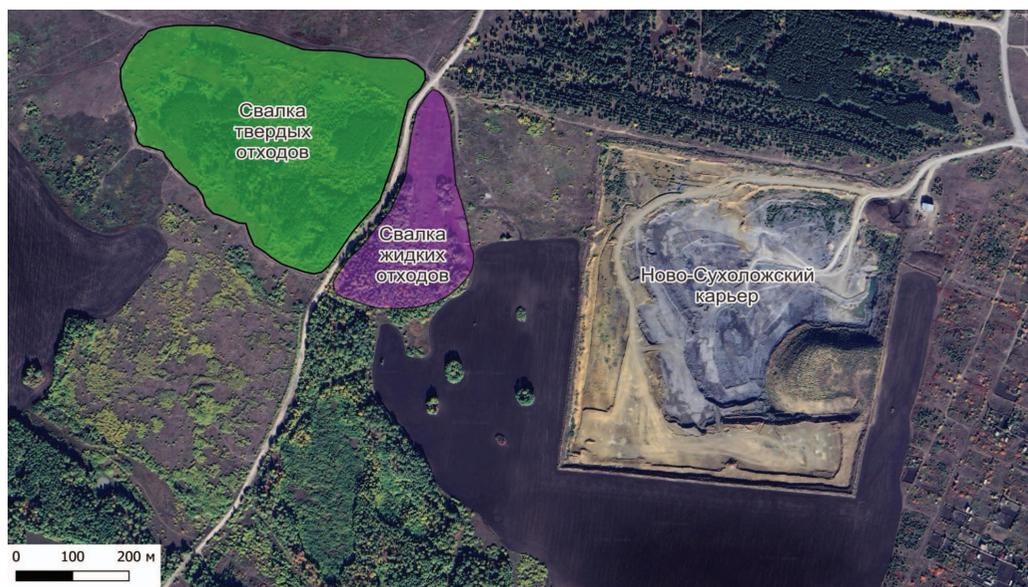


Рис. 1. Расположение свалок твердых и жидких отходов в районе Ново-Сухоложского карьера аргиллитов  
Fig. 1. Location of solid and liquid waste dumps in the area of the Novo-Sukholozhsky argillite quarry

свалки. Контроль проектных решений осуществляется созданием информационной модели текущих положений горных работ по данным маршейдерских съемок.

Результаты наблюдений за уровнем подземных вод по наблюдательной сети скважин в районе Ново-Сухоложского карьера свидетельствуют о том, что до настоящего времени дренажный водоотлив оказывает незначительное влияние на гидродинамический режим подземных вод. Динамика гидродинамического режима, характеризующаяся изменением положения гидроизогипс в пространстве и во времени, оценена соответствующими геоинформационными моделями.

Тем не менее за 20 лет отработки приток подземных вод к карьеру увеличился от 1093 до 1650 м<sup>3</sup>/сут. Источниками формирования водоотлива являются сокращение разгрузки подземных вод в р. Пышма, сработка емкости

водовмещающих пород и инфильтрационное питание на площади водосбора. Абсолютные отметки уровня подземных вод в районе месторождения уменьшились от 177 до 160 м.

Максимальное снижение уровня подземных вод (6,9 м от статического) на 2021 г. наблюдается в скважине № 17сн, расположенной вблизи свалки твердых бытовых отходов. В скважинах, расположенных на расстоянии от 500 до 875 м от зумпфа (5сн, 7сн, 8сн) на участках, характеризующихся естественным или слабонарушенным режимом подземных вод, снижение среднегодового уровня в 2021 г. по сравнению с 2000 г. составило 1,7—3,1 м.

Результаты гидрохимических исследований 2000—2021 гг. показывают, что тенденция распространения загрязнения от свалок по потоку подземных вод в северо-восточном и восточном направлении в сторону Ново-Сухоложского карьера аргиллитов сохраняется (рис. 2).

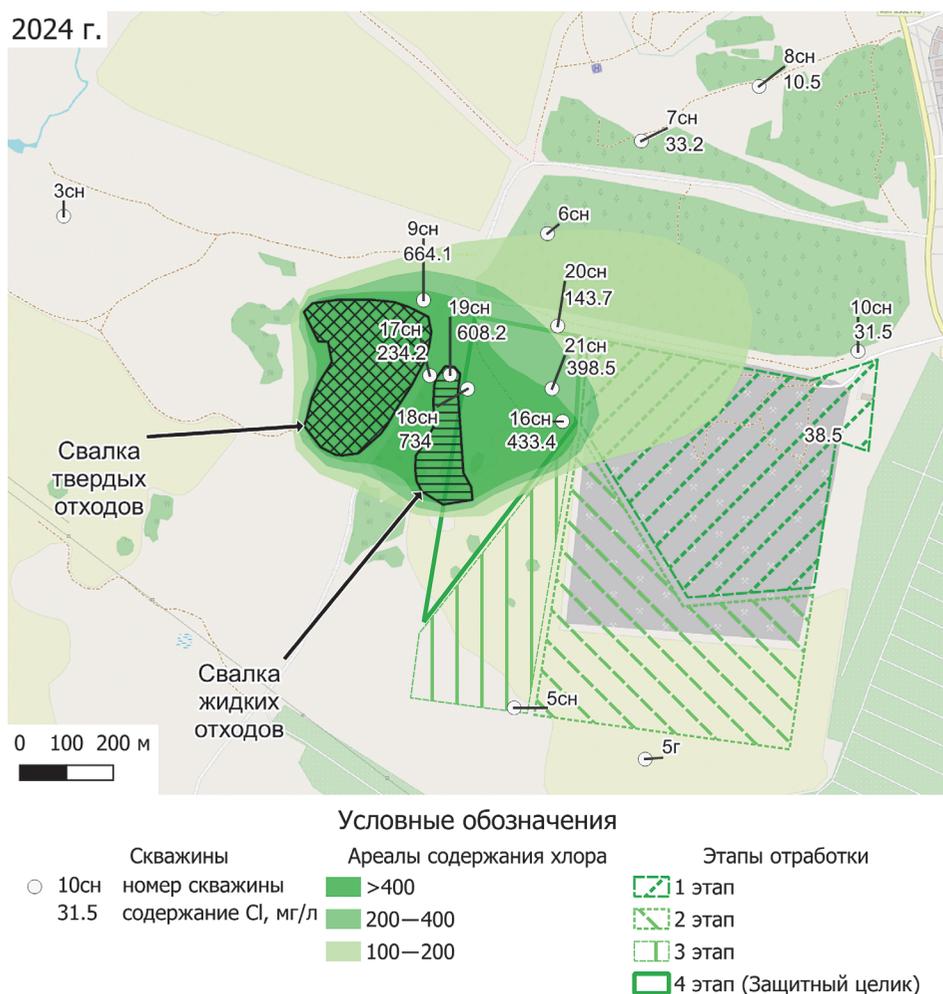
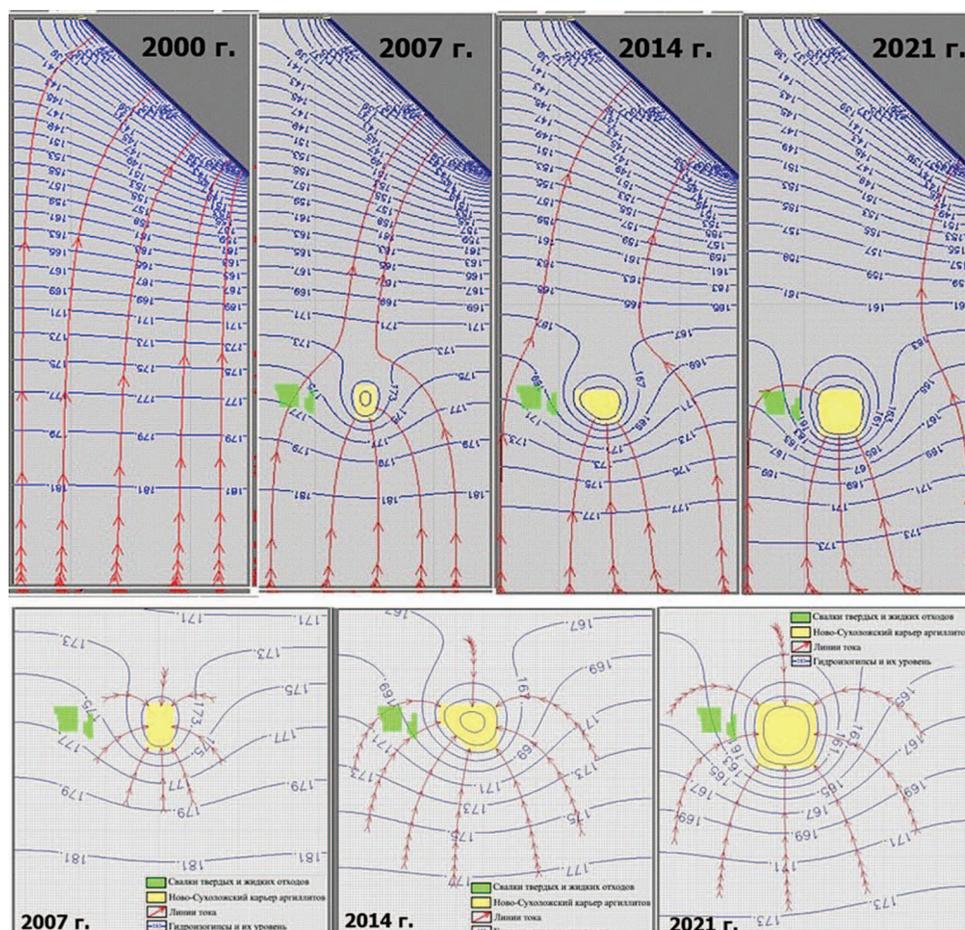


Рис. 2. Ареал загрязнения по хлор-иону

Fig. 2. Area of contamination by chlorine ion



**Рис. 3.** Гидродинамическая сетка в районе Ново-Сухоложского карьера в различные моменты его освоения (внизу приведены модели-врезки на район карьера, размер модельного блока 25×25 м). Красными стрелками показаны линии тока (направление движения подземных вод)

**Fig. 3.** Hydrodynamic grid in the Novo-Sukholozhsky quarry area at various stages of its development (insert models for the quarry area are shown below, the size of the model block is 25×25 m). The red arrows show the flow lines (direction of groundwater movement)

В естественных гидрогеологических условиях линии тока были направлены на север, к р. Пышма. Через 7 лет после начала отработки месторождения линии тока разделились, часть идет по направлению к реке на север, часть устремилась к карьерному зумпфу (рис. 3). Концентрация хлор-иона в зумпфе карьера увеличилась в 5,5 раза, на западном борту карьера достигла 61,2 мг/л, в скважине № 16сн (между карьером и свалками твердых и жидких отходов) возросла с 315,5 до 383,6 мг/л. Через 14 лет отработки, по сравнению с 2007 г., концентрация хлор-иона в зумпфе выросла в 1,2 раза, на западном борту — в 2,5 раза, в скважине № 16сн — в 1,5 раза.

Через 21 год отработки месторождения приток подземных вод к зумпфу увеличился

в 1,6 раза, загрязненные воды разбавляются чистыми, что привело к снижению концентрации хлор-иона в зумпфе в 1,3 раза, на западном борту карьера аргиллитов концентрация практически не изменилась. В скважине № 16сн концентрация хлор-иона уменьшилась в 1,2 раза.

В дальнейшем прогнозируемая ситуация с химическим загрязнением дренажных вод Ново-Сухоложского карьера улучшается, так как происходит разбавление привлекаемыми подземными водами с условно «чистых» территорий.

Приведенный пример использования численной гидрогеологической модели в составе цифрового двойника показывает, что анализ результатов мониторинга и данных цифрового моделирования позволяет на каждом этапе отработки карьера подтверждать обоснованность принятых

проектных решений и свидетельствует об эффективности и перспективности использования предлагаемого подхода к управлению сложной горнотехнической системой.

Применительно к геоинформационному мониторингу опасных производственных, геомеханических и экологических процессов необходимо:

- сопоставить, согласовать и уточнить цели и задачи цифровизации и геоинформационных исследований;

- выявить общие черты подходов к обработке данных;
- охарактеризовать различия в подходах к описанию трансформации объектов во времени, учитывая периодичность появления актуальных данных;
- определить граничные условия, определяющие устойчивость моделируемых и изучаемых систем к воздействию внешних и внутренних факторов;
- выявить величину первичных признаков дестабилизации системы и факторов, угрожающих ее разрушению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абдрахманов М.И., Лапин С.Э., Шнайдер И.В. Создание цифровой модели структуры выемочного столба лавы методом сейсмозондирования. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11—12. С. 148—158.
2. Балец А.Е., Харисов Т.Ф., Авдеев А.Н., Харисова О.Д. Обоснование оптимального порядка отработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 3. С. 55—65.
3. Жариков С.Н., Кутуев В.А. О свойствах объекта разрушения и параметрах взрывной отбойки на карьерах. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 283—289.
4. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М. Оценка тенденций изменения качества железной руды с ростом глубины отработки месторождений Качканарской группы. Маркшейдерия и недропользование. 2023. № 2(124). С. 29—37.
5. Корнилков С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Геоинформационный мониторинг для решения экологических задач горнопромышленных территорий Среднего Урала. Горная промышленность. 2022. № S1. С. 127—133.
6. Корнилков С.В., Яковлев А.М. Совершенствование прогноза качественных показателей полезных ископаемых в карьере на основе блочного моделирования. Проблемы недропользования. 2023. № 3(38). С. 47—58.
7. Лапин С.Э. Методология построения и практика применения геоинформационной системы прогноза динамики состояния горного массива в процессах подземной разработки угольных месторождений: дисс. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2020. 243 с.
8. Русских А.П., Корнилков С.В., Авдеев А.Н., Харисов Т.Ф. О процедуре расчета параметров буровзрывных работ, основанной на экспресс-оценке параметров дробимости пород массива. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 4. С. 496—505.
9. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Изменение разгрузки подземных вод при отработке месторождений цементного сырья (Свердловская область, г. Сухой Лог). Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России, Москва, 4—5 апреля 2017 года М.: Российский университет дружбы народов (РУДН), 2017. Т. 19. С. 410—415.
10. Рыбникова Л.С., Наволокина В.Ю. Оценка состояния гидросферы природно-технических систем с использованием данных геоинформационного мониторинга (на примере бассейна р. Тагил, Средний Урал). Подземная гидросфера: материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием, Иркутск, 20—26 июня 2021 года. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 534—538.
11. Соколов И.В., Корнилков С.В., Панжин А.А. Геоинформационные технологии сопровождения процессов горного производства. Горная промышленность. 2023. № S5. С. 41—46.
12. Соколов И.В., Рожков А.А., Барановский К.В. Параметризация технологии снижения ущерба от переизмельчения руды при подземной разработке месторождений. Горная промышленность. 2023. № 5. С. 78—82.
13. Стадник Д.А., Стадник Н.М., Лопушняк Е.В. К вопросу разработки методических основ информационного моделирования горных предприятий. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 3. С. 187—200. EDN: SGZFOR
14. Яковлев В.Л. О методологии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых для разработки стратегии развития минерально-сырьевой базы России. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 7. С. 5—20.
15. Mugova E., Molaba L., Walkersdorfer C. Understanding the Mechanisms and Implications of the First Flush in Mine Pools: Insights from Field Studies in Europe's

Deepest Metal Mine and Analogue Modelling. Mine Water and the Environment. 2024. Vol. 43. Iss. 1. P. 73—86.

16. *Sengupta M.* Environmental Impacts of Mining. Monitoring, Restoration, and Control. Boca Raton: CRC Press, 2021. 374 p.

## REFERENCES

1. Abdrahmanov M.I., Lapin S.E., SHnajder I.V. Creation of a digital model of the structure of a lava column using seismic sounding. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal), 2022, no. 11–2, pp. 148–158. (In Russian).
2. Balek A.E., Harisov T.F., Avdeev A.N., Harisova O.D. Justification of the optimal order of mining an ore deposit under conditions of high stress and low strength of the massif. News of higher educational institutions. Mining magazine, 2023, no 3. P. 55—65 (In Russ.).
3. Zharikov S.N., Kutuev V.A. On the properties of the object of destruction and the parameters of blasting in quarries. News of Tula State University. Earth Sciences. 2022, no. 3. P. 283—289 (In Russ.).
4. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M. Evaluation of trends in the change in the quality of iron ore with increasing depth of mining of the Kachkanar group of deposits. Mine surveying and subsoil use. 2023, no. 2(124). P. 29—37 (In Russ.).
5. Kornilkov S.V., Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., Smirnov A.Yu. Geoinformation monitoring for solving environmental problems of mining areas of the Middle Urals. Mining industry. 2022, no. S1. P. 127—133 (In Russ.).
6. Kornilkov S.V., Yakovlev A.M. Improving the forecast of quality indicators of minerals in a quarry based on block modeling. Problems of subsoil use. 2023, no. 3(38). P. 47—58 (In Russ.).
7. Lapin S.E. Methodology of construction and practice of application of geoinformation system for forecasting dynamics of state of rock mass in processes of underground development of coal deposits: Diss. ... Doctor of Technical Sciences. Yekaterinburg, 2020. 243 p. (In Russ.).
8. Russkih A.P., Kornilkov S.V., Avdeev A.N., Harisov T.F. On the procedure for calculating the parameters of drilling and blasting operations based on the express assessment of the parameters of rock massif crushability. News of Tula State University. Earth Sciences. 2023, no. 4. P. 496—505 (In Russ.).
9. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Changes in groundwater discharge during the development of cement raw material deposits (Sverdlovsk region, Sukhoi Log). Sergeev Readings. Geocological Safety of Mineral Deposit Development: Proceedings of the Annual Session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Problems of Geoecology, Engineering Geology and Hydrogeology within the Framework of the Year of Ecology in Russia, Moscow, April 4—5, 2017. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 2017. P. 410—415 (In Russ.).
10. Rybnikova L.S., Navolokina V.Yu. Assessment of the state of the hydrosphere of natural and technical systems using geoinformation monitoring data (using the example of the Tagil River basin, the Middle Urals). Underground hydrosphere: Proceedings of the XXIII All-Russian Conference on Groundwater in the East of Russia with International Participation, Irkutsk, June 20—26, 2021. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2021. P. 534—538 (In Russ.).
11. Sokolov I.V., Kornilkov S.V., Panzhin A.A. Geoinformation technologies for supporting mining production processes. Mining industry, 2023, no. S5. P. 41—46 (In Russ.).
12. Sokolov I.V., Rozhkov A.A., Baranovskij K.V. Parameterization of technology for reducing damage from ore overgrinding during underground mining. Mining industry. 2023, no. 5. P. 78—82 (In Russ.).
13. Stadnik D.A., Stadnik N.M., Pushnyak E.V. On the issue of developing methodological foundations for information modeling of mining enterprises. Proceedings of Tula State University. Earth Sciences. 2022. No. 3. P. 187—200. EDN: SGZFOR
14. Yakovlev V. L. On the methodology of integrated development of solid mineral deposits for the development of a strategy for the development of Russia's mineral resource base. News of higher educational institutions. Mining magazine. 2020. No. 7. P. 5—20 (In Russ.).
15. Mugova E., Molaba L., Wolkersdorfer C. Understanding the Mechanisms and Implications of the First Flush in Mine Pools: Insights from Field Studies in Europe's Deepest Metal Mine and Analogue Modelling. Mine Water and the Environment. 2024. Vol. 43. Iss. 1. P. 73—86.
16. *Sengupta M.* Environmental Impacts of Mining. Monitoring, Restoration, and Control. Boca Raton: CRC Press, 2021. 374 p.

## ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Корнилков С.В. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Sergey V. Kornilkov — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Рыбников П.А. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Рыбникова Л.С. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Petr A. Rybnikov — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Liudmila S. Rybnikova — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Корнилков Сергей Викторович** — доктор технических наук, главный научный сотрудник, ИГД УрО РАН.

58, ул. Мамина-Сибиряка, г. Екатеринбург 620075, Россия

e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

тел.: +7 (343) 350-64-30

SPIN-код: 6812-6970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3432-1449>

**Sergey V. Kornilkov** — Dr. Sci. (Tech.), Chief Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the RAS.

58, Mamina-Sibiryaka str., Yekaterinburg 620075, Russia

e-mail: [kornilkov@igduran.ru](mailto:kornilkov@igduran.ru)

tel.: +7 (343) 350-64-30

SPIN-code: 6812-6970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3432-1449>

**Рыбников Петр Андреевич** — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГД УрО РАН.

58, ул. Мамина-Сибиряка, г. Екатеринбург 620075, Россия

e-mail: [ribnikoff@yandex.ru](mailto:ribnikoff@yandex.ru)

тел.: +7 (343) 350-71-49

SPIN-код: 7265-2944

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

**Petr A. Rybnikov** — Cand. Sci. (Geol.-Min.), leading researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the RAS.

58, Mamina-Sibiryaka str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: [ribnikoff@yandex.ru](mailto:ribnikoff@yandex.ru)

tel.: +7 (343) 350-71-49

SPIN-code: 7265-2944

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7829-5035>

**Рыбникова Людмила Сергеевна\*** — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник ИГД УрО РАН.

58, ул. Мамина-Сибиряка, г. Екатеринбург 620075, Россия

e-mail: [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru)

тел.: +7 (343) 350-71-49

SPIN-код: 2680-2676

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

**Liudmila S. Rybnikova\*** — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Chief Researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the RAS.

58, Mamina-Sibiryaka str., Yekaterinburg, 620075, Russia

e-mail: [luserib@mail.ru](mailto:luserib@mail.ru)

tel.: +7 (343) 350-71-49

SPIN-code: 2680-2676

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4221-7879>

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author