

Геоинформатика. 2025. № 1. С. 57–65.
Geoinformatika. 2025;(1):57–65.

Информационные системы в геологии и геофизике

Научная статья
 УДК 004.942; 004.62
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-57-65>

Метод построения цифрового двойника углепородного массива для моделирования комплексной разработки недр Кузбасса

© 2025 г. — Юрий Александрович Степанов^{а)}, Леонид Николаевич Бурмин^{б)}

ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»; Кемерово, Россия

^{а)}dambo290@yandex.ru, ^{б)}LNBurmin@yandex.ru

Аннотация: Исследование посвящено разработке цифрового двойника углепородного массива для комплексного моделирования разработки недр Кузбасса. Основное внимание уделено технологии создания цифровой модели геологической структуры месторождений, включающей интеграцию разнородных данных, таких как геофизические, геологические и техногенные параметры. Применение цифрового двойника рассматривается как ключевой инструмент для повышения эффективности горнодобывающей деятельности и более глубокого понимания геологических процессов, происходящих в месторождении.

Описаны методы сбора и анализа данных, включая сейсмическую и электромагнитную разведку, которые обеспечивают достоверность модели. Использование современных геоинформационных систем позволяет объединять пространственные и атрибутивные данные в единой виртуальной среде, что способствует созданию трехмерных моделей, отображающих структуру горного массива и его физические характеристики. Модели обеспечивают возможность анализа различных сценариев разработки месторождения, прогнозирования напряженно-деформированного состояния массива и управления рисками.

Отмечена роль цифрового двойника в оптимизации процесса выбора оборудования, обеспечении безопасности и минимизации экологических последствий горной добычи. Описана возможность моделирования различных ситуаций для оценки потенциального воздействия, прогнозирования изменений и рационализации технических решений. Предложен вариант использования в качестве платформы для интеграции данных, внедрения инновационных подходов и обучения персонала.

Ключевые слова: *геоинформатика; геоинформационные системы; углепородный массив; цифровой двойник; моделирование; геологическая структура; комплексная разработка; Кузбасс.*

Для цитирования: Степанов Ю.А., Бурмин Л.Н. Метод построения цифрового двойника углепородного массива для моделирования комплексной разработки недр Кузбасса // *Геоинформатика*. — 2025. — № 1. — С. 57–65. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-57-65>.

Information systems in geology and geophysics

Original article

Method for constructing a digital twin of a coalrock mass for modeling the integrated development of the Kuzbass subsurface

© 2025 — Yuriy A. Stepanov^{а)}, Leonid N. Burmin^{б)}

Kemerovo State University; Kemerovo, Russia

^{а)}dambo290@yandex.ru, ^{б)}LNBurmin@yandex.ru

Abstract: The study focuses on the development of a digital twin of a coal-rock mass for comprehensive modeling of subsurface development in the Kuzbass region. The primary focus is on the technology for creating a digital model of the geological structure of deposits, incorporating the integration of diverse data, including geophysical, geological, and technogenic parameters. The application of the digital twin is considered a key tool for enhancing the efficiency of mining operations and deepening the understanding of geological processes occurring in the deposit.

The methods of data collection and analysis, including seismic and electromagnetic surveys, are described, ensuring the model's reliability. The use of modern geographic information systems (GIS) allows for the integration of spatial and attribute data within a unified virtual environment, facilitating the creation of three-dimensional models that represent the structure of the rock mass and its physical characteristics. These models enable the analysis of various development scenarios, prediction of the stress-strain state of the rock mass, and risk management.

The role of the digital twin in optimizing equipment selection processes, ensuring safety, and minimizing the environmental impact of mining is highlighted. The potential for modeling various scenarios to assess impacts, forecast changes, and rationalize technical solutions is discussed. Additionally, the digital twin is proposed as a platform for data integration, implementing innovative approaches, and training personnel.

Key words: *geoinformatics; GIS; coal-rock mass; digital twin; modeling; geological structure; integrated development; Kuzbass.*

For citation: Stepanov Y.A., Burmin L.N. Method for constructing a digital twin of a coalrock mass for modeling the integrated development of the Kuzbass subsurface. *Geoinformatika*. 2025;(1):57–65. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-1-57-65>. In Russ.

Введение

Кузбасс как один из ключевых регионов России славится своими богатыми месторождениями УВ-ресурсов, в большом количестве представленных в виде пластовых месторождений каменного угля. Современная индустрия добычи и эксплуатации УВ сталкивается с рядом сложных задач, таких как эффективное использование ресурсов, соблюдение экологических норм, оптимизация производственных процессов для обеспечения стабильной и безопасной разработки полезных ископаемых. Однако с течением времени освоение угольных месторождений стало задачей более сложной и многогранной, требующей комплексного подхода к моделированию как структуры и состояния углепородного массива, так и технологических процессов, протекающих в выработках. К этому необходимо добавить, что угольный пласт может терять однородность полезного ископаемого и иметь несколько разломов в пределах выемочного участка.

Для моделирования горнофизических, горно-технических процессов, процессов распределения потоков воздуха и т. п., протекающих в горнотехнических системах в процессе ведения горных работ, применяются как информационные системы общего назначения, так и узконаправленные специализированные системы с возможностью обработки геопространственных данных. Распространенные системы программного обеспечения для добывающих отраслей промышленности ориентированы в основном на оценку запасов и решение отдельных задач проектирования и планирования горных работ. В то же время практически не имеется эффективного программного обеспечения для решения таких задач, как обеспечение управления геомеханическими, газодинамическими и гидродинамическими процессами при выемке полезного ископаемого.

Комплексная разработка недр как современная парадигма предполагает интеграцию данных, новых технологий их обработки и методов моделирования для достижения этих целей. Современные вычислительные методы и совокупность компьютерных технологий позволяют проводить глубокий статистический и численный анализ геопространственных данных угольного предприятия. Геологи и горные инженеры используют большой спектр специализированных программных решений для создания трехмерных моделей месторождений, интеграции данных о физических свойствах горных пород и определения потенциальных запасов УВ.

В контексте интеграции данных исследование представляет собой попытку разработки методов создания цифрового двойника углепородного массива, что способствует улучшению понимания протекающих горно-механических и горнотехнических процессов в окрестностях ведения горных работ для эффективного управления недропользо-

ванием в Кузбассе с учетом современных вызовов и требований горнодобывающей промышленности региона.

Изначально цифровой двойник углепородного массива представляет собой виртуальное отражение реальных геофизических и технологических процессов, что делает его мощным инструментом для изучения геологической структуры, состава и свойств горных пород без необходимости непосредственного воздействия на само месторождение [1]. Это снижает риски и затраты, связанные с горнодобывающими операциями, и способствует более рациональному и предсказуемому управлению ресурсами.

Важным аспектом значимости цифрового двойника является его способность улучшать безопасность ведения горных работ и экологическую устойчивость добычи полезных ископаемых [2]. За счет моделирования различных сценариев и анализа данных, полученных от цифрового двойника, появляется возможность принимать более обоснованные управленческие решения в отношении безопасности работников предприятия и охраны окружающей среды. Это особенно актуально в нынешней ситуации, когда требования к экологической ответственности становятся все более жесткими. Кроме того, цифровой двойник углепородного массива может способствовать оптимизации процессов добычи и обеспечению более эффективного использования ресурсов, что имеет важное экономическое значение для региона Кузбасса и всей страны. Его создание также способствует совершенствованию научных методов и технологий в горнодобывающей индустрии, что может привести к увеличению конкурентоспособности российских предприятий на мировом рынке.

Следовательно, создание цифрового двойника углепородного массива представляет собой важный шаг в направлении улучшения устойчивости, безопасности и эффективности добычи УВ-ресурсов в Кузбассе, что имеет долгосрочное значение для региона и страны в целом.

Таким образом, актуальным является исследование в области разработки метода построения цифрового двойника углепородного массива, который может быть эффективно использован в составе горнотехнической системы угольного предприятия для моделирования горно-геологических и горнотехнических процессов при проведении комплексной разработки недр Кузбасса.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач.

1. Провести сбор и анализ данных о геологической структуре и свойствах углепородных месторождений в Кузбассе. Это включает в себя изучение геологических карт, материалов бурения, геофизических данных и других источников информации.

2. Разработать метод для построения цифрового двойника, включая выбор подходящих геологических и геофизических моделей, а также методов интеграции данных.

3. Исследовать применимость разработанного метода и оценить потенциал цифрового двойника в комплексной разработке недр Кузбасса, а также определить потенциальные выгоды для промышленности и экологии.

Сбор и анализ данных

Сбор данных о углепородных месторождениях начинается с проведения разнообразных геологических и геофизических исследований. Это включает в себя сейсмическую разведку, георадарную геолокацию, акустическую разведку и другие методы. Собранные данные включают в себя информацию о глубине залегания угольных пластов, структуре горных пород, характеристиках геологических слоев и многое другое [3]. Для достоверности построения цифрового двойника углепородного массива необходимо воспользоваться различными методами разведки, так как модель структуры породного массива уточняется за счет накопления данных, полученных в результате сбора отраженных сигналов. Рассмотрим несколько видов разведки подземной части горного предприятия, активно применяемых на практике.

Метод сейсмической разведки предоставляет информацию о подземных образованиях путем измерения и анализа сейсмических волн, возникающих при их движении через горные породы. Сейсмическая разведка позволяет определить глубину, форму и характер геологических слоев под землей и помогает оценить размеры и потенциальные запасы УВ в месторождении [4]. Результаты сейсмической разведки используются для выбора оптимальных мест для бурения скважин. Это снижает затраты и риски при разработке месторождений. Также сейсмическая разведка играет важную роль в обеспечении безопасности добычи УВ. Она помогает выявить геологические неоднородности и принимать меры предосторожности. Путем анализа данных сейсмической разведки можно также оценить возможное воздействие добычи на окружающую среду, что позволяет разрабатывать меры по ее сохранению и минимизации негативных последствий [5].

Метод электромагнитной разведки является геофизическим методом исследования, который использует электрические и магнитные свойства пород и грунта для определения их состава, структуры и других характеристик. Метод электроразведки может применяться для определения глубины залегания геологических структур. Различные частоты электромагнитных исследований могут проникать на разную глубину, что позволяет получить информацию о геологических формациях на различных глубинах. Метод также может быть при-

менен для изучения грунтовых вод и определения их уровня и потока. Это важно при разработке мер по охране окружающей среды и оценке безопасности ведения горных работ [6].

Зондирование становлением поля в ближней зоне может включать применение различных сенсоров и приборов для измерения физических параметров в области, находящейся ближе к поверхности земли. Зондирование может применяться для мониторинга геологических процессов, таких как движение грунта, изменения состава пород и другие явления, которые могут влиять на эксплуатацию месторождений.

После сбора данных происходит их многокритериальный анализ и предобработка. Для дальнейшего использования собранных данных на этапе их предобработки необходимо решить несколько задач. Одна из них заключается в очистке данных от постороннего шума и структурировании полученных результатов в некоторую объектную модель с учетом специфики разнородности данных, полученных в результате разных видов геофизической разведки. Собранные и проанализированные данные о месторождениях служат основой для создания цифровых двойников углепородных массивов [7].

Полученный набор структурированных данных является основой для создания цифрового двойника. Применение цифровых двойников для геологического моделирования представляет собой подход, который позволяет виртуализировать процессы исследования и управления природными ресурсами, включая горнодобывающую промышленность, путем создания цифровой реплики реального объекта на основе данных и симуляций. Это дает возможность геологам и инженерам воссоздавать сложные геологические сценарии, анализировать изменения на глубине, прогнозировать поведение пород и оценивать запасы полезных ископаемых [8]. Перечисленные направления могут быть использованы для оптимизации стратегий разработки, управления рисками и более точного планирования добычи, что в свою очередь способствует улучшению экономической эффективности и экологической устойчивости горнодобывающих операций.

Разработка метода моделирования

Систематическое исследование и создание цифровых моделей позволяет получить трехмерное визуальное представление о том, как угольные и УВ-месторождения залегают внутри земной коры, а также о геометрии и структуре сопутствующих горных пород. Моделирование геологической структуры требует интеграции данных, полученных из различных источников, таких как сейсмические исследования, георадарная геолокация, материалы бурения скважин и геохимические анализы [1]. Эти данные объединяются и анализируются для

создания более полного и точного представления о месторождении. Моделирование не ограничивается только геометрическими аспектами. Оно также включает в себя определение физических параметров, таких как пористость, проницаемость, плотность, электропроводность и другие характеристики горных пород. Такие параметры существенны для компьютерного моделирования широкого класса изучаемых геофизических и геомеханических процессов разрушения горных пород при взаимодействии с угледобывающими механизированными комплексами, направленного на прогноз риска возникновения аварийных ситуаций при ведении горных работ [9].

На рис. 1 представлена идея генерализации геомоделирования различных процессов на уровне представления данных. Цифровые модели состояния углепородного массива, созданные в результате обработки разведочных данных моделирования гипсометрии пластов, обеспечивают основу для стратегического планирования разработки месторождений. Они позволяют проводить виртуальное моделирование различных сценариев изменения горно-геологических параметров при ведении горных работ, оптимизировать технические решения и оценивать экономическую целесообразность разработки. Создание цифрового двойника угле-

породного массива представляет собой процесс разработки виртуальной модели этого массива на основе собранных данных и геологических исследований.

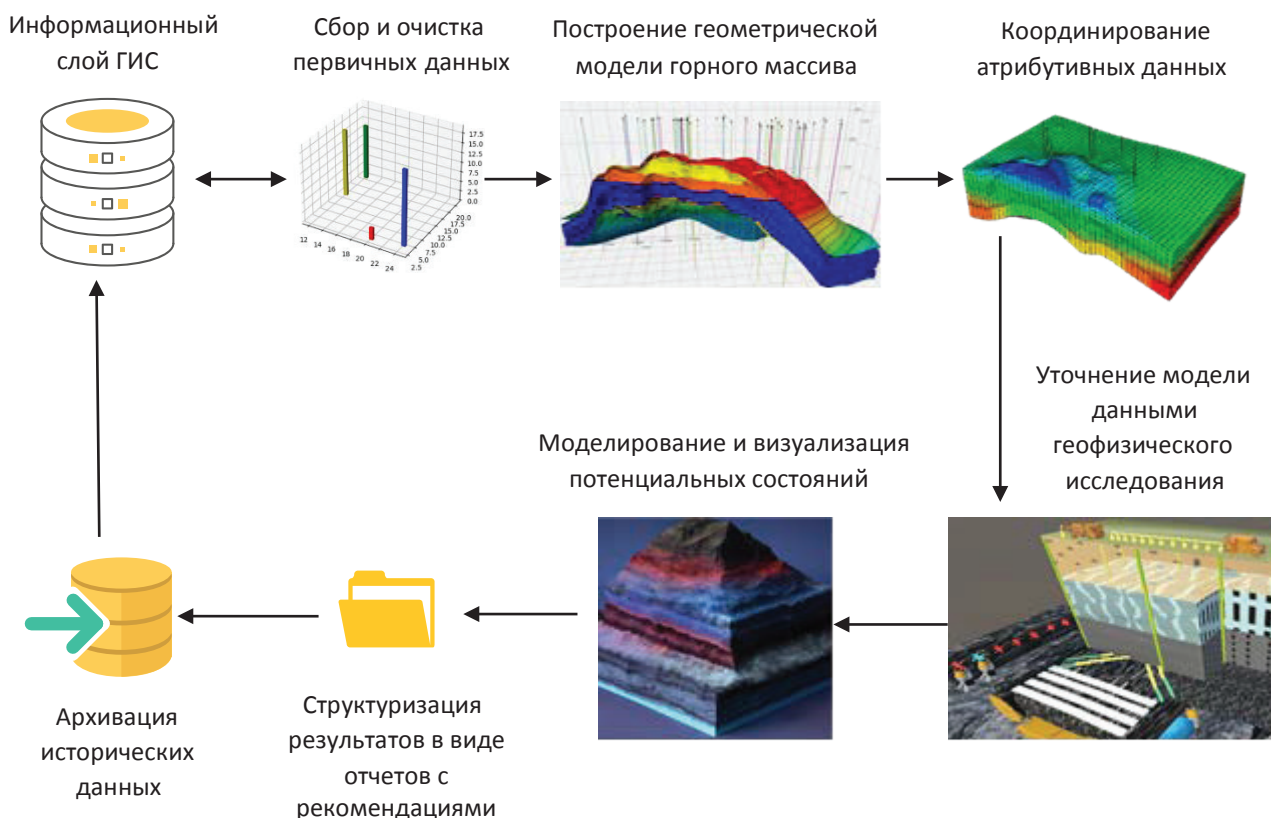
Цифровой двойник является виртуальным представлением реального углепородного массива и позволяет геологам и инженерам более точно понимать его структуру, характеристики и потенциал для разработки. Несколько видов геофизической разведки можно интерпретировать как слои, объединенные общей архитектурой в единую горную геоинформационную систему, состоящие из различных срезов, каждый из которых отвечает за свою часть функциональности и может компоноваться под конкретные задачи моделирования, необходимые на текущем этапе исследования (рис. 2). Такой подход формирует координированное информационное пространство, где оси определяются как «способ геофизической разведки» и «уровень архитектуры ГИС». Концептуальная архитектура ГИС состоит из слоев, которые, в свою очередь, состоят из кластеров (рис. 3).

1. Информационный слой отвечает за хранение и организацию данных, включая пространственные, атрибутивные, временные и метаданные.

2. Программный слой аналитической обработки проводит анализ и обработку географиче-

Рис. 1. Идея генерализации геомоделирования

Fig. 1. The Idea of Generalizing Geomodeling



ских данных, включая аналитику, моделирование, прогнозирование и автоматизацию процессов. Он включает, в т. ч., интеллектуальный анализ данных на основе алгоритмов машинного обучения.

3. Интерфейсный слой обеспечивает взаимодействие пользователей с системой ГИС через различные интерфейсы, включая веб-интерфейсы, мобильные приложения, API и прочие, а также отвечает за распределение ролей и безопасность.

4. Аппаратно-технический слой отвечает за обеспечение технической инфраструктуры для работы системы ГИС- серверы, сетевое оборудование и вычислительные мощности и организует программно-аппаратные интерфейсы между исследовательским оборудованием и самой ГИС.

5. Слой метаинтеграции обеспечивает интеграцию и сопряжение различных компонентов системы ГИС, а также интеграцию с внешними системами и данными.

6. Слой 3D-визуализации и интерпретации обеспечивает визуализацию географических данных в трехмерном пространстве и их интерпретацию для анализа и принятия решений.

7. Слой контроля качества отвечает за непротиворечивость, чистоту и проводит регулярную

верификацию различных частей системы, а также отвечает за контроль качества и достоверности применимых моделей.

Такой подход может включать в себя геоинформационные системы, позволяющие объединить разнообразные геологические и геофизические данные в одном пространственном контексте. На основе данных проводится моделирование геологической структуры месторождения. Оно включает в себя создание трехмерных моделей, которые отображают расположение угольных пластов, пород-проявлений и других элементов. Важной частью создания цифрового двойника является определение физических параметров и характеристик горных пород и угля.

Это может включать в себя определение пористости, проницаемости, эластичности и электропроводности пород и др.

На основе данных и моделирования создаются цифровые карты и трехмерные модели углепородного массива. Эти модели могут быть визуализированы с использованием специализированного программного обеспечения и предоставить более наглядное представление о месторождении.

Рис. 2. Концептуальная архитектура ГИС

Fig. 2. Conceptual Architecture of GIS

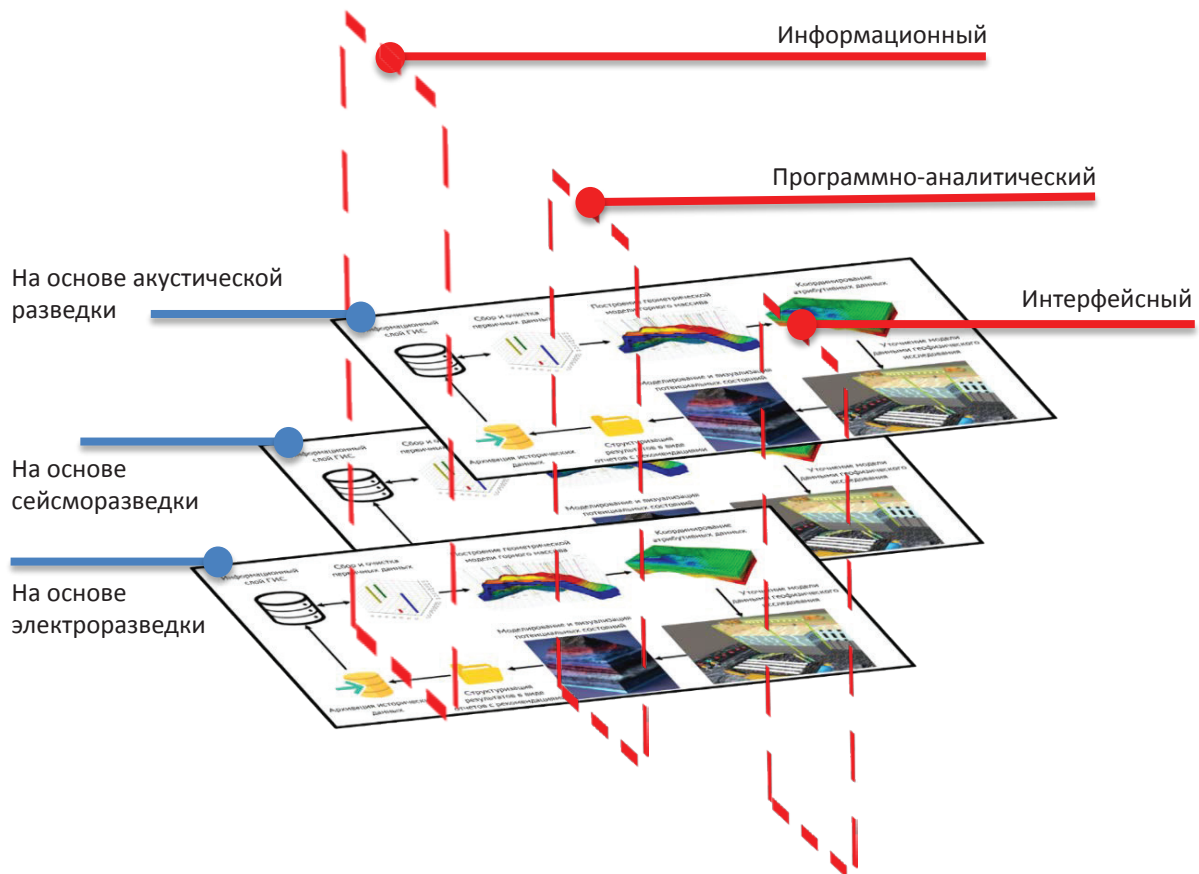
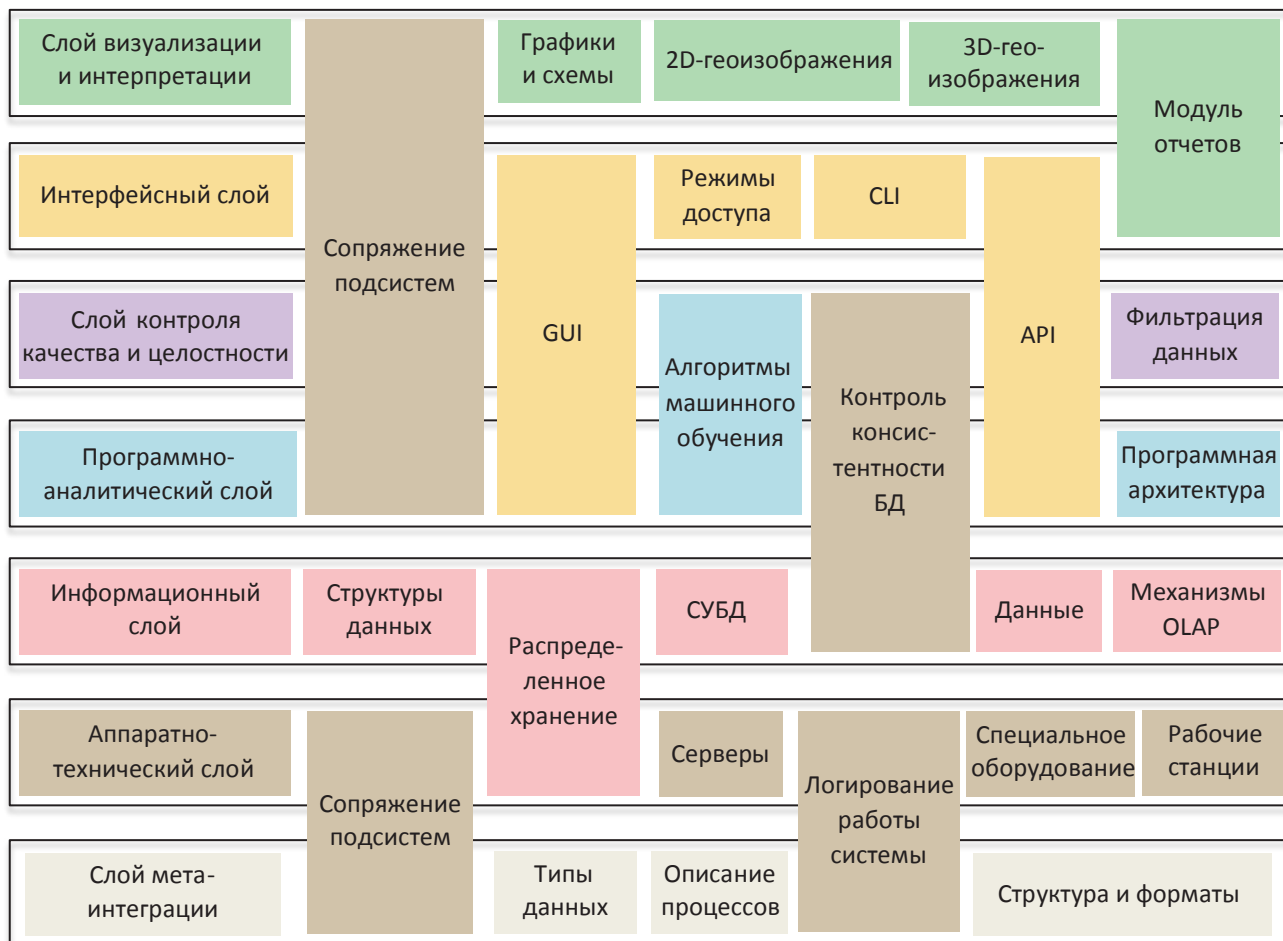


Рис. 3. Архитектурные срезы геоинформационной системы
 Fig. 3. Architectural Layers of a Geographic Information System



Созданный цифровой двойник позволяет проводить виртуальное моделирование различных сценариев разработки месторождения, анализировать его потенциал и оптимизировать стратегии добычи (рис. 4).

Применение цифровой модели в комплексной разработке недр Кузбасса

Интегрированные данные используются для создания единой геологической модели месторождения. Эта модель представляет собой трехмерное виртуальное координированное пространство с представлением геологических структур, пластов и других элементов месторождения. Интегрированные данные позволяют определить границы и характеристики элементов, что является значимым для понимания геологической структуры и особенностей месторождения.

Интегрированные данные повышают достоверность геологического моделирования и идентификации тектонических нарушений в породном массиве. Это повышает достоверность результатов, а также позволяет провести более детальный ана-

лиз различных сценариев разрушения породного массива при ведении горных работ. Сценарии могут включать в себя уточнение местоположения буровых скважин, планирование технологических особенностей очистных работ и оценку потенциальных рисков возникновения аварийных ситуаций.

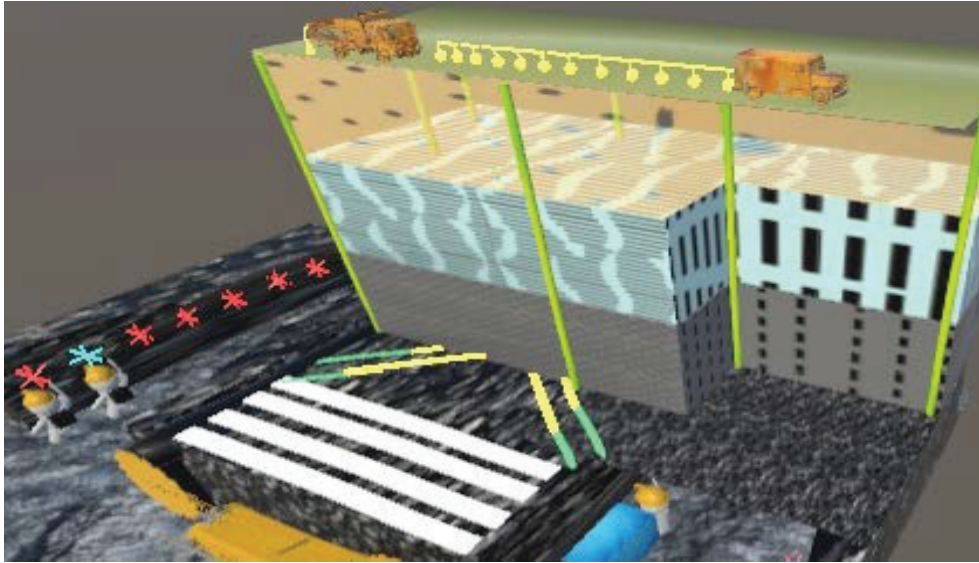
Проектирование горных выработок

С помощью цифрового двойника можно виртуально разместить выработки на месторождении таким образом, чтобы максимизировать добычу угля или УВ. Моделирование позволяет определить оптимальное местоположение выработок и разведочных скважин с учетом геологической структуры и свойств месторождения.

Прогнозирование изменений напряженно-деформированного состояния углепородного массива

Цифровой двойник может использоваться для прогнозирования параметров напряжения и смещения на различных этапах ведения горных работ, что помогает планировать производственные про-

Рис. 4. Принципиальная визуализация моделирования сценариев с использованием цифрового двойника
Fig. 4. Principle Visualization of Scenario Modeling Using a Digital Twin



цессы на основе потенциального изменения геофизических параметров для принятия управленческих решений в условиях неопределенности. Это в свою очередь делает возможным оценить влияние разработки на окружающую среду на основе сведений о трещиноватости и газоносности пород, что позволяет спланировать дополнительные мероприятия, связанные с улучшением вентиляционной инфраструктуры.

Оптимизация использования оборудования

Цифровой двойник может применяться для оптимизации работы горнодобывающего и бурового оборудования. Сценарии включают в себя выбор наилучших стратегий бурения и эксплуатации оборудования: в частности, в зависимости от напряженно-деформированного состояния выбираются силовые характеристики поддерживающих крепей, а от мощности пласта зависит тип угольного комбайна.

Обучение персонала

Цифровой двойник может быть использован для проведения инструктажа сотрудников предприятия по ключевым действиям при возникновении нештатных и аварийных ситуаций. Модель может быть дополнена технологией виртуальной реальности для увеличения погружения в контекст реальных условий.

Платформа для инноваций

Цифровой двойник служит платформой с открытой архитектурой для визуализации различных этапов ведения горных работ в пределах горного отвода, что позволяет интегрировать задачи разных специалистов угольного предприятия для обеспечения стабильной и безаварийной работы шах-

ты. Полученные модели могут быть использованы для обмена данными и сотрудничества между различными стейкхолдерами, включая государственные органы, инвесторов и научные институты.

Заключение

Цифровой двойник угленосного массива представляет собой гибкий инструмент, который способствует устойчивой и эффективной разработке природных ресурсов и содействует снижению негативного воздействия на окружающую среду. Перспективы его дальнейшего использования широки и продолжают расширяться с развитием новых технологий и методов геологических исследований: например, цифровой двойник может стать ядром аналитической геоинформационной системы для поддержки принятых решений задач угольного предприятия.

В результате выполненной работы достигнуты следующие результаты.

1. Моделирование различных сценариев добычи с использованием цифрового двойника позволит определить оптимальные параметры бурения, что может привести к увеличению производительности до 18 %.
2. Имитация аварийных ситуаций (например, обрушения пород) показала, что использование цифрового двойника может сократить время реагирования на аварии. Это позволило снизить потенциальные потери за счет своевременного принятия мер.
3. Симуляция гипотетических сценариев утечек и выбросов загрязняющих веществ позволила разработать более эффективные меры по их предотвращению. В результате моделирования техно-

генных ситуаций появляется возможность снизить риск экологических инцидентов.

4. Анализ сценариев разработки различных участков месторождения позволил оптимизировать планирование и использование ресурсов, что приведет к увеличению коэффициента извлечения угля.

Полученные выводы подчеркивают важность и потенциал применения цифровых двойников в горнодобывающей и геологической сфере, а также их значимость для устойчивого управления природными ресурсами и современного горнодобывающего производства.

Список источников

1. Стадник Д.А., Габараев О.З., Стадник Н.М., Григорян К.Л. Повышение качества цифровых «двойников» горнодобывающих предприятий на базе стандартизации атрибутивного наполнения технологических 3D-моделей в ГИС // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 202–212. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212.
2. Лисицкий Д.В., Осипов А.Г., Савиных В.Н. Цифровой двойник территории и методы геокогнитивного моделирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 1. – С. 206–212. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.
3. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В. Стратегия, технологии и технические средства поиска, разведки и разработки морских месторождений в Арктике // Вестник МГТУ. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 437–451.
4. Самсонов М.Т. Общие принципы методики разведки шахтных полей в Карагандинском угольном бассейне // Известия ТПИ. – 1959. – Т. 99. – С. 307–324.
5. Пригара А.М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений // Известия СО секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2019. – Т. 42. – № 2 (67). – С. 176–184. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184.
6. Ингеров О. Применение электроразведочных методов при поисках залежей углеводородов // Записки Горного института. – 2005. – Т. 162. – С. 15–25.
7. Волошин В.А., Безносков А.В. Цифровизация производственных процессов на примере угольных шахт // Вестник СибГИУ. – 2021. – № 3 (37). – С. 31–36.
8. Решетняк С.Н. Анализ методов построения прогнозных моделей электропотребления в условиях высокопроизводительных угольных шахт // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16. – № 2. – С. 28–34. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-2-28-34.
9. Мешков А.А., Попов А.Л., Попова Ю.В., Смолин А.В., Шабаров А.Н. Прогноз опасных явлений в пределах рабочих угольных пластов для шахтного поля им. В.Д. Ялевского // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2. – С. 22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-22-33.

References

1. Stadnik D.A., Gabaraev O.Z., Stadnik N.M., Grigoryan K.L. Digital twin quality improvement for mines through standardization of attribute content for 3D GIS-based geotechnical modeling. *Mining informational and analytical bulletin*. 2020;(11-1):202–212. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-202-212.
2. Lisitsky D.V., Osipov A.G., Savinykh V.N. Digital Twin of the terrain and methods geocognitive modeling. *Interexpo Geo-Siberia*. 2022;1:206–212. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-1-206-212.
3. Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V. Strategy, technologies, and technical means of searching, exploration and development of sea fields in Arctic. *Vestnik of MSTU*. 2014;17(3):437–451.
4. Samsonov M.T. Obshchie printsipy metodiki razvedki shakhtnykh polei v Karagandinskom ugol'nom basseine [General principles of exploration methodology in the Karaganda coal basin]. *Izvestiya TPI*. 1959;17(3):437–451.
5. Prigara A.M. Specifics of the underground seismics method using shear waves with reflection separation. Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. *Geology, exploration and development of mineral deposits*. 2019;42(2):176–184. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184.
6. Ingerov O. Primenenie ehlektrozvedochnykh metodov pri poiskakh zalezhei uglevodorodov [Application of electromagnetic methods in the search for hydrocarbon deposits]. *Journal of Mining Institute*. 2005;162:15–25.
7. Voloshin V.A., Beznosov A.V. (2021). Production processes digitalization by the example of coal mines. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2021;(3):31–36.
8. Reshetnyak S.N. (2020). Analysis of methods for constructing predictive models of power consumption in high-performance coal mines. *Electrical and data processing facilities and systems*. 2020;16(2):28–34. DOI: 10.17122/1999-5458-2020-16-2-28-34.
9. Meshkov A.A., Popov A.L., Popova Yu.V., Smolin A.V., Shabarov A.N. Prediction of hazardous phenomena within operating coal seam for the Yalovsky mine field. *Mining informational and analytical bulletin*. 2020;(2):22–33. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-22-33.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024 г., одобрена после рецензирования 09.12.2024 г., принята к публикации 10.01.2025 г.
The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 10.01.2025.

Информация об авторах

Степанов Юрий Александрович

Доктор технических наук
Заведующий кафедрой цифровых технологий
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
650000 Кемерово, ул. Красная, д. 6
e-mail: dambo290@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7552-6857
ResearcherID: AAZ-2627-2021
Scopus Author ID: 57194103909
SPIN-код: 2273-4212

Бурмин Леонид Николаевич

Кандидат технических наук
Доцент кафедры цифровых технологий
ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»
650000 Кемерово, ул. Красная, д. 6
e-mail: LNBurmin@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-9875-231X
ResearcherID: IAQ-8546-2023
Scopus Author ID: 57194109458
SPIN-код: 6187-6713

Information about authors

Yuriy A. Stepanov

Doctor of Technical Sciences (Grand PhD in Engineering sciences),
Associate Professor
Head of the Department of Digital Technologies
Kemerovo State University
6, Krasnaya str., Kemerovo, 650000, Russia
e-mail: dambo290@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7552-6857
ResearcherID: AAZ-2627-2021
Scopus Author ID: 57194103909
SPIN-код: 2273-4212

Leonid N. Burmin

Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering sciences),
Associate Professor
Associate Professor at the Department of Digital Technologies
Kemerovo State University
6, Krasnaya str., Kemerovo, 650000, Russia
e-mail: LNBurmin@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-9875-231X
ResearcherID: IAQ-8546-2023
Scopus Author ID: 57194109458
SPIN-код: 6187-6713