

ДЕТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИПЛАСТОВОГО СТРОЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В.В. Таланин¹, В.Г. Бехер¹, Е.В. Дятлова¹

¹ НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: talanin.vv@misis.ru

Аннотация: Актуальность работы обусловлена растущей потребностью угледобывающей отрасли в точных и универсальных способах и инструментах моделирования месторождений, обеспечивающих не только оценку геологических запасов, но и оптимизацию проектирования и планирования горных работ на базе эксплуатационных запасов. Существующие геологические (ресурсные) модели, построенные по классическому подходу под стандарты Государственной комиссии по запасам (каркасное моделирование по выделенным кондиционным параметрам пласта), не адаптированы для оперативного решения эксплуатационных задач: они статичны, содержат усредненные качественные показатели (пластовые), что приводит к генерализации эксплуатационных показателей добываемого угля, и при изменении кондиций процесс перестроения модели становится трудоемким. В данной статье авторы обосновывают целесообразность перехода к созданию гибких и динамичных эксплуатационных моделей на базе геологических моделей, созданных путем детального сеточного моделирования внутрипластового строения. Предлагаемый подход рассматривается как основа для создания полноценного цифрового двойника угольного месторождения, интегрированного в систему принятия технологических решений. Модели, содержащие угольные слои, соизмеримые интервалам геологического опробования, позволяют оперативно выполнять сборку угольных пластов под разные кондиции, создавать эксплуатационные модели с учетом потерь и разубоживания по выемочным единицам пластов, моделировать селективную выемку с пересчетом качественных показателей добытого угля.

Ключевые слова: ресурсная модель, эксплуатационная модель, детальное внутрипластовое строение, сеточное моделирование, цифровой двойник месторождения, горно-геологические информационные системы, гибкое обновление ресурсной модели, изменение кондиционных параметров, режим отработки, селективная выемка.

Для цитирования: Таланин В. В., Бехер В. Г., Дятлова Е. В. Детальное моделирование внутрипластового строения для создания эксплуатационных цифровых двойников угольных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 20-31. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_20.

Detailed modeling of internal structure of coal seams to build operational digital twins of coal fields

V.V. Talanin¹, V.G. Bekher¹, E.V. Dyatlova¹

¹ NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: talanin.vv@misis.ru

Abstract: The relevance of the study is conditioned by the growing need of the coal mining industry for the accurate and universal methods and tools of modeling to ensure both evaluation of geological reserves and optimization of mining design and planning on the basis of commercial reserves. The established geological (resource) models built classically to comply with the standards of the State Commission on Mineral Reserves (frame modeling using identified quality parameters of coal seams) are unadaptable to real-time solution of operational tasks: these models are static and contain averaged quality indicators (in situ), which leads to generalization of operational characteristics of produced coal, and when the qualities change, the re-modeling takes much time and labor. In this paper, the authors substantiate the expediency of switching to creation of flexible and dynamic operation models based on geological models created in the detailed network modeling of the internal structure of coal seams. The proposed approach is taken as a framework for creating a full-fledged digital twin of a coal deposit, integrated in the system of technological decision-making. The models of coal layers proportionate to the intervals of geological sampling allow prompt assembly of coal seams for different quality requirements, creation of operation models with regard to loss and dilution per extraction unit of coal seams, and modeling of selective extraction with re-calculation of quality factors of produced coal.

Key words: resource model, operational model, detailed internal structure of seam, network modeling, digital twin of deposit, mining and geological information systems, flexible updating of resource model, change of quality requirements, mining mode, selective extraction.

For citation: Talanin V. V., Bekher V. G., Dyatlova E. V. Detailed modeling of internal structure of coal seams to build operational digital twins of coal fields. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):20-31. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_20.

Введение

В настоящее время создание и применение трехмерных цифровых моделей месторождений получило широкое распространение [1 – 3]. Основная цель таких моделей – снижение трудозатрат и оптимизация решений геологических и инженерных задач на любых этапах освоения месторождений, а также повышение уровня точности качественно-количественных, горно-геологических и горнотехнических показателей [4 – 6]. Анализ производственного опыта в области эксплуатации цифровых двойников месторождений показывает, что на сегодняшний день их возможности не используются даже наполовину. Если в части уточнения качества и количества геологических запасов данный функционал с переменным успехом освоен, то в части эксплуатации месторождений

находится на ранней стадии освоения. Для решения задач, связанных с добычей полезных ископаемых, необходимо создание эксплуатационных моделей месторождений, которые позволяют прогнозировать изменение качества и количества добытого угля в зависимости от схем выемки, параметров потерь и разубоживания, а также выхода концентрата.

Построение эксплуатационной модели – это процесс создания трехмерной цифровой модели или трансформации существующей геологической (ресурсной) модели, позволяющей выполнять качественно-количественную оценку добытого полезного ископаемого и получаемого концентрата как в целом по месторождению, так и по годам (этапам) и отдельным участкам эксплуатации объекта недропользования [7, 8].

Таким образом, эксплуатационная модель должна обеспечивать пользователя следующими данными:

- объемами, качеством, физико-механическими свойствами и пространственной геометризацией кондиционных геологических и эксплуатационных (добытых) запасов полезных ископаемых;
- объемами потерь и разубоживания;
- объемами и физико-механическими свойствами вскрышных пород;
- дополнительными данными (по горнотехническим, гидрогеологическим и геотехническим условиям, тектонике, литологической структуре, выходу концентрата и пр.).

Угольные месторождения в силу своего генезиса характеризуются слоистой структурой массива. При создании ресурсных моделей угольных месторождений, особенно слабонаклонного и наклонного залегания, применяется сеточное моделирование. Такой подход позволяет выполнить моделирование всей структуры угольного пласта с детальностью геологического опробования. На сегодняшний день ресурсное моделирование угольных месторождений выполняется упрощенно, даже не по чистым угольным пачкам (ЧУПам), а в целом по пласту с учетом 100% засорения [9]. Переход от такой ресурсной модели к эксплуатационной затруднен, зачастую некорректен и нецелесообразен, особенно в случае применения селективной выемки при добыче угля. Решением данной задачи по сохранению преемственности моделирования в зависимости от стадии освоения месторождения и направления использования моделей является переход к детальному моделированию внутрипластового и околопластового строения [10, 11].

Анализ и обсуждение

Фундаментальная проблема современной практики ресурсного модели-

рования угольных месторождений заключается в том, что процесс создания цифрового двойника начинается не с первичных геологических данных, а с их существенно переработанной интерпретации. Геологическая база данных для построения 3D-модели формируется на основе данных из геологоразведочных отчетов, где угольные пласты уже сформированы в виде композитов в двухмерном пространстве разреза согласно утвержденным кондиционным параметрам. Фактически, ключевое решение о границах пласта (включении/исключении породных прослоев, учете зольности) принимается «на бумаге» и является необратимым до этапа 3D-моделирования. Кондиции, определяющие минимальную мощность пласта, максимальную мощность породного прослоя и максимальную зольность, воспринимаются не как инструмент сценарного анализа, а как догма для всего месторождения [12].

Трехмерная каркасная модель пласта в таких условиях строится путем переноса в 3D-среду уже геологически проинтерпретированных и согласованных на плоскости 2D-композитов, как показано в табл. 1, в результате чего получаем геометрически и качественно жестко зафиксированный объект недр, оптимизированный под единственный вариант кондиций, утвержденный ГКЗ, с подсчитанными и поставленными на баланс запасами. Безусловно, у классического подхода есть свои операционные плюсы: минимальные трудозатраты на моделирование, компактность и низкая вычислительная нагрузка [13]. Однако стоит заметить, что такая эффективность достигается путем потери детальной информации о природной неоднородности угленосной толщи.

Критическое ограничение классических ресурсных моделей для задач проектирования и планирования открытых

горных работ вскрывается при попытке гибкого управления качеством. Статичная модель, основанная на жестких кондициях, не позволяет алгоритмически пересобирать выемочные слои под изменившиеся производственные или экономические условия. Это исключает возможность оперативного рассмотрения селективной отработки сложноструктурного пласта с выделением премиального низкосольного и высококалорийного угля, тогда как такая возможность позволила бы в периоды благоприятной конъюнктуры повысить маржинальность или гарантировать выполнение контрактов с потребителями угля. Потенциально ценные угольные слои, подобные слоям 1A_1, 1A_2 и 1A_3 с зольностью от 8,5% до 10,8% (см. табл. 1), «растворяются» в композите, делая невозможным планирование их селективной выемки. Такие ресурсные модели, по

сути, являются «черным ящиком» для создания горных моделей (ROM, Run of Mine) и планирования полного жизненного цикла предприятия (LOM, Life of Mine), блокируя возможность полноценной многовариантной технико-экономической оценки рисков и потенциала отработки [14 – 16].

Для перехода к динамическому управлению горным производством на всех стадиях — от определения оптимальных контуров карьера до оперативного планирования — необходима смена парадигмы. Целью становится создание не ресурсной модели с агрегированными угольными пластами согласно кондициям протокола ГКЗ, а детальной геологической модели, которая отражает угленосную толщу как непрерывное стратифицированное пространство с изменяющимися качественно-количественными показателями (табл. 1). Единица-

Таблица 1

Пример обработки пластопересечения при классическом моделировании пласта и детальном моделировании внутрипластового строения ресурсных моделей
Example of seam cross-section processing in classical seam modelling and detailed modelling of intra-seam structure of resource models

Тип пород	Исходные показатели по геологической базе данных (ГБД)			Классическое моделирование ресурсной модели				Детальное моделирование внутрипластового строения ресурсной модели			
	мощность интервала (m), м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %	название пласта (слоя)	мощность пласта (слоя), м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %	название пласта (слоя)	мощность пласта (слоя), м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %
уголь	0,5	1,37	8,5	1A	4,5	1,56	28,9	1A_1	0,5	1,37	8,5
уголь	0,5	1,38	9,5					1A_2	0,5	1,38	9,5
уголь	1	1,39	10,8					1A_3	1	1,39	10,8
алевролит	0,3	2,3	80					bd1A_4	0,3	2,30	80
уголь	0,5	1,40	11,5					1A_4	0,5	1,40	11,5
уголь	0,5	1,41	12,7					1A_5	0,5	1,41	12,7
песчаник	0,4	2,55	85					bd1A_6	0,4	2,55	85
уголь	0,4	1,42	14,0					1A_6	0,4	1,42	14,0
уголь	0,4	1,43	15,0					1A_7	0,4	1,43	15,0

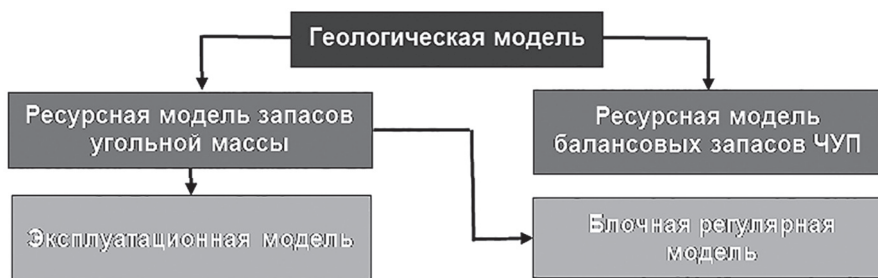


Рис. 1. Схема взаимосвязей и последовательности создания сеточных и блочных регулярных моделей при детальном моделировании внутрипластового строения угольных пластов

Fig. 1. Scheme of relationships and sequence for constructing grid-based and block-based regular models in detailed modeling of intra-seam structure of coal seams

ми моделирования в таком подходе становятся не угольные пласты, заданные административными кондициями и межпластовыми вскрышными породами, а угольные слои и породные прослои, выделенные на основе первичных геофизических данных (каротаж) и геологических границ.

Это фундамент геологически достоверного эксплуатационного цифрового двойника.

Создание геологической модели без привязки к кондициям требует соблюдения ряда взаимосвязанных принципов, обеспечивающих ее научную обоснованность, практическую применимость и воспроизводимость:

1) принцип геологической обоснованности: модель должна учитывать генезис, тектоническое строение и пространственную изменчивость характеристик месторождения;

2) принцип неоднородности и изменчивости среды: угольный пласт не является идеально однородным телом; его строение и качество варьируют под влиянием комплекса седиментационных и постседиментационных процессов;

3) принцип достаточности фактических данных: качество модели напрямую зависит от плотности и репрезентативности сети опробования, а также от качества первичных данных бурения и опробования;

4) принцип комплексного анализа качественных показателей: взаимосвязанные показатели (зольность, теплота сгорания, выход летучих, содержание серы) необходимо анализировать совместно, а не изолированно.

Схема на рис. 1 демонстрирует архитектуру использования детальной геологической модели как единого источника данных для всех последующих горно-геометрических построений. От геологической модели, не привязанной к кондициям, ответвляются два ключевых направления:

1) ресурсная модель балансовых запасов чистых угольных пачек — предназначена для строгого учета и отслеживания остатка балансовых запасов, подсчитанных и поставленных на государственный баланс.

2) ресурсная модель запасов угольной массы — модель, включающая 100% внутрипластовое засорение. От нее, в свою очередь, отходят две эксплуатационные ветви:

- эксплуатационная модель для календарного планирования в ПО тактического планирования;
- блочная регулярная модель для модуля оптимизации контуров карьеров.

Таким образом, изменение кондиционных параметров не требует перестроения всей геологической основы, а сводится к параметрической переком-

поновке слоев, что обеспечивает беспрецедентную гибкость и скорость многовариантного сценарного анализа, а также создает возможности для автоматизации процесса.

Количество слоев, на которые делится угольный пласт, определяется детальностью исходного геологического опробования и требуемой полнотой отображения внутрипластовой и околопластовой структуры. Принципиальное отличие предлагаемого подхода от классического иллюстрирует рис. 2.

При классическом подходе пласт 3V оконтуривается в соответствии с утвержденными ГКЗ кондициями. Некоторые внутрипластовые породные прослои (bd3V) включаются в контур пла-

ста, обуславливая его сложное строение и являясь источником внутрипластового засорения. Угольный слой 3V_4, не удовлетворяющий заданным кондициям по мощности или зольности, в пласт не включается и как самостоятельный объект не рассматривается. При любом пересмотре кондиций (например, снижении минимальной мощности пласта) каркасную модель необходимо перестраивать полностью или частично — и так при каждом изменении параметров.

При детальном сеточном моделировании на этапе кодировки каждый угольный слой и каждый породный прослой получает собственный уникальный идентификатор независимо от кондиционных границ пласта (рис. 2). Эта деталь-

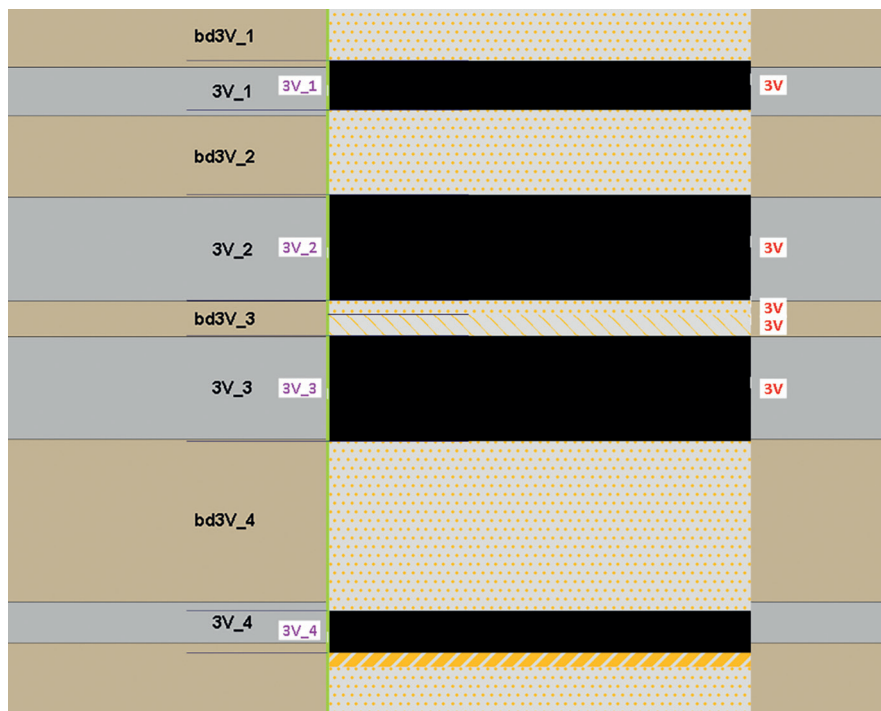


Рис. 2. Кодировка сеточной ресурсной модели с детальным внутрипластовым строением: 3V — кодировка пласта в соответствии с выбранными кондиционными параметрами; 3V_n — кодировка угольного слоя в сеточной ресурсной модели; bd3V_n — кодировка внутрипластового породного прослоя в сеточной ресурсной модели

Fig. 2. Coding of the grid-based resource model with detailed intra-seam structure: 3V — seam coding according to the selected cut-off parameters; 3V_n — coding of the coal layer in the grid-based resource model; bd3V_n — coding of the intra-seam rock partings in the grid-based resource model

ная структура в геологической модели служит основой для оперативной генерации различных вариантов ресурсных и эксплуатационных моделей.

Основным недостатком детального подхода к моделированию угольных месторождений является значительное увеличение числа слоев, что повышает трудоемкость создания модели и ее размерность. Это напрямую диктует выбор методов интерполяции, обеспечивающих приемлемый баланс между достоверностью и вычислительной сложностью.

Анализ исходных качественных показателей при структурном моделирова-

нии внутрипластового строения включает следующие последовательные шаги: формирование слоевых выборок по каждому выделенному слою; статистический анализ слоевых выборок; анализ плотности и равномерности сети опробования; построение вариограмм. Учитывая, что внутрипластовые угольные слои представляют собой типичные пластообразные тела, для их интерполяции хорошо зарекомендовали себя детерминированные методы — метод обратных расстояний (IDW) и его модификация, метод анизотропных обратных расстояний (AIDW).

Таблица 2

Пример формирования эксплуатационных качественно-количественных показателей валовой выемки при детальном моделировании внутрипластового строения эксплуатационных моделей

Example of generating operational qualitative and quantitative indicators for bulk extraction during detailed modelling of the intra-seam structure in run-of-mine (ROM) models

Тип породы	Исходные данные по ГБД			Эксплуатационная модель на основе классической ресурсной модели				Эксплуатационная модель на основе детального моделирования внутрипластового строения ресурсной модели			
	мощность интервала (m), м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %	название слоя	мощность слоя, м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %	название слоя	мощность слоя, м	удельный вес (γ), т/м³	зольность (Ad), %
уголь	0,5	1,37	8,5	зачистка	0,13	1, 56	28,9	зачистка	0,13	1,37	8,5
уголь	0,5	1,38	9,5	уголь	4,5	1,58	30,9	уголь	4,5	1,59	31,4
уголь	1	1,39	10,8								
алевролит	0,3	2,3	80								
уголь	0,5	1,40	11,5								
уголь	0,5	1,41	12,7								
песчаник	0,4	2,55	85								
уголь	0,4	1,42	14								
уголь	0,4	1,43	15								
песчаник	0,1	2,55	85	при-сечка	уголь	4,5	1,58	при-сечка	4,5	1,59	31,4

Таблица 3

Пример формирования эксплуатационных качественно-количественных показателей селективной выемки при детальном моделировании внутрипластового строения эксплуатационных моделей

Example of generating operational qualitative and quantitative indicators for selective extraction during detailed modelling of the intra-seam structure for run-of-mine (ROM) models

Код слоя	Исходные данные по ГБД			Эксплуатационная модель на основе детального моделирования внутрипластового строения ресурсной модели			
	мощность интервала (m), м	удельный вес (γ), т/м ³	зольность (Ad), %	название слоя	мощность слоя, м	удельный вес (γ), т/м ³	зольность (Ad), %
1A_1	0,5	1,37	8,5	зачистка	0,1	1,37	8,5
1A_2	0,5	1,38	9,5	уголь	2,0	1,43	15,6
1A_3	1	1,39	10,8				
bd1A_4	0,3	2,3	80	присечка	0,2	2,3	80
				алевролит			
1A_4	0,5	1,40	11,5	зачистка	0,1	1,40	11,5
1A_5	0,5	1,41	12,7	уголь	1,0	1,52	24,4
bd1A_6	0,4	2,55	85				
				присечка	0,3	2,55	85,00
				песчаник			
1A_6	0,4	1,42	14	зачистка	0,1	1,42	14
1A_7	0,4	1,43	15	уголь	0,8	1,57	28,9
Почва	0,1	2,55	85				
				присечка			

Результаты этих методов для пластовых залежей зачастую сопоставимы с кригингом [17, 18], что в сочетании с соблюдением принципов достаточности данных и комплексного анализа показателей делает их применение в условиях большого числа слоев методически обоснованным и в большинстве случаев целесообразным.

Ключевым элементом перехода от детальной ресурсной модели к эксплуатационной является композитирование — процесс геометрического объединения слоев и усреднения соответствующих качественных показателей в пределах кондиционного пласта или проектируе-

мого выемочного слоя. Основой композитирования служит расчет средневзвешенного значения, что методически корректно для угля, поскольку разные пробы могут иметь разную массу, а большинство качественных показателей выражается либо в процентах от массы, либо в единицах, нормированных на массу (ккал/кг).

Обязательным условием является наличие данных по рассматриваемому показателю в каждом объединяемом слое. В ситуациях, когда это условие выполняется лишь частично (например, отсутствие ряда качественных показателей в породных прослоях), применяются рас-

четные методы, регламентированные ГОСТ 147-2013 и ГОСТ 27313-2015 [19].

Использование сеточной ресурсной модели с детальным внутрипластовым строением расширяет возможности создания эксплуатационных моделей как для селективной, так и для валовой выемки угольной массы с учетом последующего обогащения.

Это наглядно демонстрирует сравнение табл. 2 и 3.

При валовой выемке на основе классической ресурсной модели (см. табл. 2) «зачистка» кровли планируется с усредненной зольностью пласта 28,9%, в то время как детальная модель показывает, что этот слой представлен низкосольным углем с зольностью 8,5%, а реальная зольность основного добываемого слоя составляет 31,4%. Еще больший потенциал раскрывается при селективной выемке (см. табл. 3): детальная модель позволяет выделить и оценить два самостоятельных угольных слоя с зольностью 15,6% и 24,4%, а также точно спрогнозировать разубоживание от присечек породных прослоев алевролита и песчаника.

При добавлении экономических показателей такой подход позволяет напрямую рассчитывать рентабельность различных схем отработки [20], закладывая фундамент полнофункционального эксплуатационного цифрового двойника.

Заключение

Классический подход к ресурсному моделированию угольных месторождений, основанный на жесткой фиксации кондиционных параметров на этапе геологоразведочных отчетов, практически исчерпал свой потенциал для задач современного горного планирования. Статичная каркасная модель, созданная под единственный вариант кондиций ГКЗ,

неизбежно скрывает природную неоднородность угленосной толщи и блокирует возможность полноценного многовариантного сценарного анализа.

В качестве альтернативы предложен и методически обоснован переход к детальному внутрипластовому сеточному моделированию, ключевыми элементами которого являются: геологическая модель без привязки к кондициям, параметрическая генерация производных моделей с последующим агрегированием пластов или выемочных слоев.

Реализация предлагаемого подхода при моделировании конкретного месторождения показала его принципиальные преимущества. Детальная модель не только раскрывает реальную картину внутрипластового засорения, скрытую в классическом композите, но и позволяет точно прогнозировать потери и разубоживание при различных схемах отработки угольных пластов.

В свою очередь, выделение в эксплуатационной модели промпродуктов с различной зольностью и калорийностью дает возможность для каждого выемочного сценария дифференцированно оценить объем угольной массы, направляемой на обогатительную фабрику, и ожидаемый выход концентрата. В совокупности это позволяет перейти от оценки рядовой угольной массы к прогнозу выхода конечной товарной продукции и создает полноценную основу для многовариантного технико-экономического анализа схем отработки.

Таким образом, предлагаемый подход закладывает фундамент полнофункционального эксплуатационного цифрового двойника угольного месторождения как динамической системы, способной оперативно адаптироваться к изменению рыночной конъюнктуры, контрактных требований к качеству и технологических ограничений горного производства.

Перспективы дальнейших исследований: 1) разработка подходов к детальному внутрипластовому моделированию для крутопадающих месторождений с наклонными разведочными скважинами, где геометризация слоев требует учета сложной пространственной ориентации пластопересечений; 2) создание алго-

ритма автоматизированного перехода от детальных ресурсных моделей к эксплуатационным и далее к регулярным блочным моделям, что обеспечит интеграцию предлагаемой методики в промышленные горно-геологические информационные системы на угольных месторождениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марьина А. В., Долбня О. В. Исследование востребованности горно-геологических информационных систем на российском трудовом рынке // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2023. — Т. 2. — С. 169—173.
2. Сапронова Н. П., Федотов Г. С., Глатко Я. С. Особенности решения задач маркшейдерского обеспечения горных работ в среде ГГИС Micromine // Маркшейдерский вестник. — 2020. — № 2(135). — С. 31—37.
3. Смирнова А. Д., Федотов Г. С., Михайлова Т. В. Геологическое моделирование участка Тугяской площади Кузбасса в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond // Уголь. — 2024. — № 6(1181). — С. 119—124. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-119-124.
4. Маниковский П. М., Васютин Л. А., Сидорова Г. П. Методика моделирования рудных месторождений в ГГИС // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2021. — № 27(2). — С. 6—14. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14.
5. Стадник Д. А., Стадник Н. М., Жилин А. Г., Кожиев З. В. Основные методические принципы автоматизированной раскройки рудного поля при проектировании в ГГИС // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2021. — № 4. — С. 475—488. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-475-488.
6. Liu Y., Zhang X., Guo W., Kang L., Gao J., Yu R., Sun Y., Pan M. Research status of and trends in 3D geological property modeling methods: A review // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 11, article 5648. DOI: 10.3390/app12115648.
7. Басаргин А. А., Писарев В. С. Особенности моделирования объектов геологической среды при разработке месторождений твердых полезных ископаемых с применением ГГИС Micromine // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2021. — Т. 1. — С. 100—110. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-100-110.
8. Федотов Г. С., Беленко М. В., Деревянкин В. В., Фещенко В. Е. Годовое планирование горных работ с использованием ГГИС Micromine в условиях Стойленского ГОКа // Горный журнал. — 2021. — № 6. — С. 20—23.
9. Агафонов И. А., Малофеев Д. В. Опыт защиты блочных моделей по угольным месторождениям в ГКЗ // Уголь. — 2022. — № 3. — С. 90—94. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-90-94.
10. Стадник Д. А., Стадник Н. М., Григорян К. Л., Кожиев З. В. Актуализация технологических показателей технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых с помощью компьютерных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5-1. — С. 170—184. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_170.
11. Стадник Д. А., Стадник Н. М. Управление качеством полезного ископаемого с помощью цифрового календарного планирования горнодобывающего предприятия / Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2021). — Владикавказ, 2021. — С. 120—122.
12. Yuan J., Liu G., Chai S. 3D geological finite modeling and dynamic updating method of fault slope in open-pit coal mine // Scientific Reports. 2024, vol. 14, no. 1, article 29906. DOI: 10.1038/s41598-024-81872-3.
13. Наставко Е. В., Наставко А. В., Кайзер Ф. Ю., Соловицкий А. Н. О цифровой модели угольного месторождения в Кузбассе в ГГИС Micromine // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — № 1(127). DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.23.

14. Ракшин А. А. Life of Mine. Преимущества перед традиционными способами планирования горных работ // Золото и технологии. — 2023. — № 3(61). — С. 110 — 115.
15. Gu Xiaowei, Qing Wang, Xiaochuan Xu, Xiaoqian Ma Phase planning for open pit coal mines through nested pit generation and dynamic programming // Mathematical Problems in Engineering. 2021, vol. 2021, article 8219431. DOI: 10.1155/2021/8219431.
16. Pulungan L., Arbianto V. Coal handling quality from pits to stockpiles to market specifications // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 830, no. 4, article 042039. DOI: 10.1088/1757-899X/830/4/042039.
17. Cui M., Hou E., Lu T., Hou P., Feng D. Study on spatial interpolation methods for high precision 3D geological modeling of coal mining faces // Applied Sciences. 2025, vol. 15, no. 6, article 2959. DOI: 10.3390/app15062959.
18. Faidatulaila R., Marwanza I., Purwiyono T. T. Variography analysis on the assessment of coal deposit quality using the ordinary kriging method // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2598, article 060002. DOI: 10.1063/5.0126896.
19. Голынец О. С., Медведевских М. Ю., Эпштейн С. А., Кочеткова Е. М. Стандартные образцы состава угля и продуктов его добычи и переработки. Часть 2 // Контроль качества продукции. — 2024. — № 1. — С. 45 — 49.
20. Рождественская И. А., Завалько Н. А., Лукичев К. Е., Зубенко А. В., Лаффах А. М. Применение технологий больших данных для повышения устойчивости и эффективности угольной промышленности в условиях цифровой трансформации отрасли // Уголь. — 2025. — № 1(1189). — С. 82 — 92. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-82-92. **МИАБ**

REFERENCES

1. Mar'ina A. V., Dolbnya O. V. Investigation of the demand for mining-geological information systems on the Russian labor market. *Problems of Development of Hydrocarbon and Ore Deposits*. 2023, vol. 2, pp. 169 — 173. [In Russ].
2. Sapronova N. P., Fedotov G. S., Glatko Ya. S. Features of solving surveying support tasks for mining operations in the Micromine GGIS environment. *Mine Surveying Bulletin*. 2020, no. 2(135), pp. 31 — 37. [In Russ].
3. Smirnova A. D., Fedotov G. S., Mikhailova T. V. Geological modeling of the Tutuyasskaya area in Kuzbass in the mining and geological information system Micromine Origin & Beyond. *Ugol'*. 2024, no. 6(1181), pp. 119 — 124. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-119-124.
4. Manikovskiy P. M., Vasyutich L. A., Sidorova G. P. Methodology for modeling ore deposits in GGIS. *Transbaikal state university journal*. 2021, no. 27(2), pp. 6 — 14. [In Russ]. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-2-6-14.
5. Stadnik D. A., Stadnik N. M., Zhilin A. G., Kozhieva Z. V. Basic methodological principles of automated ore field block caving during design in GGIS. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2021, no. 4, pp. 475 — 488. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-475-488.
6. Liu Y., Zhang X., Guo W., Kang L., Gao J., Yu R., Sun Y., Pan M. Research status of and trends in 3D geological property modeling methods: A review. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 11, article 5648. DOI: 10.3390/app12115648.
7. Basargin A. A., Pisarev V. S. Features of modeling geological environment objects during development of solid mineral deposits using Micromine GGIS. *Interexpo GEO-Siberia*. 2021, vol. 1, pp. 100 — 110. [In Russ]. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-1-100-110.
8. Fedotov G. S., Belenko M. V., Derevyankin V. V., Feshchenko V. E. Annual planning of mining operations using Micromine GGIS at the Stoilensky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 6, pp. 20 — 23. [In Russ].
9. Agafonov I. A., Malofeev D. V. Experience of block model protection for coal deposits in GKZ. *Ugol'*. 2022, no. 3, pp. 90 — 94. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-3-90-94.
10. Stadnik D. A., Stadnik N. M., Grigoryan K. L., Kozhiev Z. V. Technological updating of mineral mining projects using computer technologies. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 170 — 184. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_170.
11. Stadnik D. A., Stadnik N. M. Quality management of mineral resources using digital calendar planning of mining enterprise. *Problemy kompleksnoy i ekologicheskoy bezopasnoy pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya — 2021)* [Problems of Complex and

Environmentally Safe Processing of Natural and Technogenic Mineral Raw Materials (Plaksin Readings — 2021)], Vladikavkaz, 2021, pp. 120–122. [In Russ].

12. Yuan J., Liu G., Chai S. 3D geological fine modeling and dynamic updating method of fault slope in open-pit coal mine. *Scientific Reports*. 2024, vol. 14, no. 1, article 29906. DOI: 10.1038/s41598-024-81872-3.

13. Nastavko E. V., Nastavko A. V., Kaizer F. Yu., Solovitsky A. N. On the digital model of a coal deposit in Kuzbass in Micromine GGIS. *International Research Journal*. 2023, no. 1(127). [In Russ]. DOI: 10.23670/IRJ.2023.127.23.

14. Raksin A. A. Life of Mine. Advantages over traditional methods of mining operations planning. *Gold and Technologies*. 2023, no. 3(61), pp. 110–115. [In Russ].

15. Gu Xiaowei, Qing Wang, Xiaochuan Xu, Xiaoqian Ma Phase planning for open pit coal mines through nested pit generation and dynamic programming. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, vol. 2021, article 8219431. DOI: 10.1155/2021/8219431.

16. Pulungan L., Arbianto V. Coal handling quality from pits to stockpiles to market specifications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 830, no. 4, article 042039. DOI: 10.1088/1757-899X/830/4/042039.

17. Cui M., Hou E., Lu T., Hou P., Feng D. Study on spatial interpolation methods for high precision 3D geological modeling of coal mining faces. *Applied Sciences*. 2025, vol. 15, no. 6, article 2959. DOI: 10.3390/app15062959.

18. Faidatulaila R., Marwanza I., Purwiyono T. T. Variography analysis on the assessment of coal deposit quality using the ordinary kriging method. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2598, article 060002. DOI: 10.1063/5.0126896.

19. Golynets O. S., Medvedevskikh M. Yu., Epshtein S. A., Kochetkova E. M. Standard samples of coal composition and products of its mining and processing. Part 2. *Product Quality Control*. 2024, no. 1, pp. 45–49. [In Russ].

20. Rozhdestvenskaya I. A., Zavalko N. A., Lukichev K. E., Zubenko A. V., Laffakh A. M. Application of big data technologies to enhance resilience and efficiency of the coal industry under digital transformation of the industry. *Ugol'*. 2025, no. 1(1189), pp. 82–92. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-82-92.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Таланин Владимир Вадимович¹ — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: talanin.vv@misis.ru, ORCID ID: 0000-0001-9432-1443,

Бехер Вадим Григорьевич¹ — горный инженер,
e-mail: v.bekher@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-1300-9456,

Дятлова Екатерина Валерьевна¹ — аспирант,
e-mail: lopushnyack.c@yandex.ru, ORCID ID: 0009-0004-6839-0022,

¹ НИТУ МИСИС.

Для контактов: Таланин В.В., e-mail: talanin.vv@misis.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Talanin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: talanin.vv@misis.ru, ORCID ID: 0000-0001-9432-1443,

V.G. Bekher¹, Mining Engineer, e-mail: v.bekher@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1300-9456,

E.V. Dyatlova¹, Graduate Student, e-mail: lopushnyack.c@yandex.ru,
ORCID ID: 0009-0004-6839-0022,

¹ NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: V.V. Talanin, e-mail: talanin.vv@misis.ru.

Получена редакцией 14.05.2026; получена после рецензии 24.07.2026; принята к печати 20.09.2026.

Received by the editors 14.05.2026; received after the review 24.07.2026; accepted for printing 20.09.2026.