ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2-1):131-144
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831:622.333 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_131

УРОВНИ ЗРЕЛОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД: КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕХОДА ОТ РЕАКТИВНОГО К СТРАТЕГИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

А.А. Сидоренко[1], С.А. Сидоренко[2]

[1] АО «СУЭК», Москва, Россия, e-mail: SidorenkoAA@suek.ru
[2] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: Эволюция технологий подземной угледобычи – увеличение длин комплексно механизированных лав и отрабатываемых ими выемочных столбов, рост вынимаемой мощности пласта – привели к парадоксальной ситуации: рост технологических возможностей сопровождается увеличением неопределенности и рисков. Управление состоянием массива горных пород на большинстве шахт по-прежнему носит реактивный характер и не интегрировано в систему долгосрочного планирования. Предложена концептуальная модель зрелости системы управления состоянием массива горных пород, включающая три уровня: оперативный (реактивный), тактический (проактивный) и стратегический (превентивный). Для каждого уровня определены объекты управления, характер принятия решений, типичные задачи, инструменты и степень интеграции в систему планирования. Предложена матрица критериев для диагностики текущего уровня зрелости. Обоснована необходимость междисциплинарной интеграции (геология – технология – геомеханика – аэрогазодинамика) как условия перехода между уровнями. На примере шахт АО «СУЭК-Кузбасс» продемонстрировано влияние глубины и газоносности на производительность лав и обоснована практическая значимость перехода к стратегическому уровню управления в рамках итеративной системы долгосрочного планирования.

Ключевые слова: подземная угледобыча, управление состоянием массива горных пород, стратегическое планирование, геомеханическая неопределенность, интегрированное планирование, длинный очистной забой, цифровая трансформация.

Для цитирования: *Сидоренко А. А., Сидоренко С. А.* Уровни зрелости управления состоянием массива горных пород: концептуальная модель перехода от реактивного к стратегическому управлению на угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 131–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_131.

Ground control maturity levels: a conceptual model for transitioning from reactive to strategic management in coal mines

A.A. Sidorenko[1], S.A. Sidorenko[2]

[1] JSC «SUEK», Moscow, Russia, e-mail: SidorenkoAA@suek.ru
[2] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

© А.А. Сидоренко, С.А. Сидоренко. 2026.

Abstract: The evolution of underground coal mining technologies has led to a paradoxical situation: increasing technological capabilities are accompanied by growing uncertainty and risks. Ground control at most mines remains reactive and is not integrated into the life-of-mine planning system. This paper proposes a conceptual maturity model for ground control comprising three levels: operational (reactive), tactical (proactive), and strategic (preventive). For each level, management objects, decision-making approaches, typical tasks, tools, and the degree of integration into the planning system are defined. A matrix of criteria for diagnosing the current maturity level is proposed. The necessity of interdisciplinary integration (geology – technology – geomechanics – aerogasdynamics) as a condition for transitioning between levels is substantiated. Using the example of JSC SUEK-Kuzbass mines, the impact of depth and gas content on longwall productivity is demonstrated and the practical significance of transitioning to strategic management within an iterative life-of-mine planning system is justified.

Key words: underground coal mining, ground control, maturity levels, strategic planning, geomechanical uncertainty, integrated planning, longwall mining, digital transformation.

For citation: Sidorenko A. A., Sidorenko S. A. Ground control maturity levels: a conceptual model for transitioning from reactive to strategic management in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):131-144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_131.

Введение

Современная подземная угледобыча характеризуется парадоксальной закономерностью: совершенствование технологий очистной выемки, обеспечивающее рост потенциальной производительности очистных забоев, одновременно приводит к увеличению геологической, геомеханической и газодинамической неопределенности [1, 2]. Увеличение длины лав до 400 м и более, выемочных столбов до 4–6 км, вынимаемой мощности пласта до 6–9 м формирует условия, при которых пространственная изменчивость горно-геологических параметров становится критическим фактором, определяющим эффективность и безопасность горных работ [3, 4].

Опыт работы шахт АО «СУЭК-Кузбасс» демонстрирует эту закономерность: на шахте им. В.Д. Ялевского производительность лав снизилась с 1011 тыс. т/мес при глубине 200 м (лава 5003, 2017 г.) до 284 тыс. т/мес при глубине 430 м (лава 5007, 2023 — 2025 гг.) [2, 3]. Основные причины — рост метанообильности выемочных участков и снижение устойчивости основной кровли при последующем уменьшении скоростей подвигания лав. Следует отметить, что шахта им. В.Д. Ялевского отрабатывает запасы в относительно благоприятных условиях — отсутствует влияние таких серьезных факторов, как влияние сближенных пластов и геодинамическая опасность, поэтому для других шахт, работающих в более сложных условиях, достижение таких рекордных нагрузок фактически недоступно.

Управление состоянием массива горных пород (УСМГП) традиционно рассматривается как совокупность мероприятий по обеспечению устойчивости отдельных выработок и безопасности очистных работ [5, 6]. Такой подход, адекватный для условий небольших длин лав и выемочных столбов, становится недостаточным при современных масштабах горных работ, когда решения, принятые на этапе проектирования раскройки шахтного поля, предопределяют условия ведения горных работ на деся-

тилетия вперед [7, 8]. Анализ отечественной и зарубежной практики показывает, что на большинстве угольных шахт УСМГП остается фрагментированным: геологическое моделирование, геомеханические расчеты, аэрогазодинамическое обеспечение и планирование горных работ выполняются разрозненно, различными специалистами, в различных программных средах, без системной обратной связи [3, 5, 9]. Это приводит к потере междисциплинарных эффектов и накоплению ошибок при передаче данных между этапами.

Цель настоящей работы — разработка концептуальной модели уровней зрелости УСМГП, систематизирующей подходы к управлению массивом горных пород и определяющей траекторию перехода от реактивного к стратегическому управлению в системе итеративного LOM (Life of Mine) планирования подземных горных работ на угольных шахтах.

Парадокс современной подземной угледобычи

Рост неопределенности при совершенствовании технологий

Эволюция технологий подземной угледобычи в последние два десятилетия привела к существенному изменению масштабов горных работ. Повышение надежности и энерговооруженности оборудования механизированных комплексов обеспечило рост интенсивности отработки запасов. Увеличение вынимаемой мощности пласта, длины лав и выемочных столбов сформировало предпосылки для достижения рекордных показателей добычи при отработке запасов в благоприятных горно-геологических условиях [2, 3].

Однако каждый из перечисленных факторов одновременно генерирует специфические риски. Повышение интенсивности отработки запасов приводит к росту метанообильности выработок даже при низкой природной газоносности пласта. Увеличение вынимаемой мощности усиливает влияние подработки и надработки, расширяет зоны формирования техногенных коллекторов метана в сближенных пластах [10, 11]. Увеличение длины лав повышает стоимость очистных комплексов и объемы работ по перемонтажам, а также снижает скорость подвигания очистных забоев. Удлинение выемочных столбов создает значительную изменчивость горно-геологических и горнотехнических условий по длине столба [3, 7].

Количественная оценка влияния глубины на производительность

Анализ данных по лавам 5002–5007 шахты им. В.Д. Ялевского по пласту 50 в период 2017–2025 гг. (см. рис. 1) позволяет количественно оценить влияние глубины на производительность. Средняя производительность лав при переходе от глубины 200 м к глубине более 400 м снизилась более чем в три раза. Анализ показал, что зависимость средней месячной нагрузки ($Q_л$) на лаву от глубины (H) аппроксимируется полиномом четвертой степени с коэффициентом детерминации $R^2 = 1$, что свидетельствует о нелинейном, ускоряющемся характере деградации показателей [2, 3]:

$$Q_л = 0{,}0000009 \cdot H^4 - 0{,}0013 \cdot H^3 + 0{,}7588 \cdot H^2 - 195{,}76 \cdot H + 19\,419.$$

Основными факторами снижения являются: рост абсолютной газообильности выемочного участка, необходимость снижения скорости подвигания забоя для обеспечения допустимой концентрации метана, а также связанное с этим снижение устойчивости непосредственной кровли, увеличение продолжительности и частоты остановок по газовому фактору, усложнение геомеханической обстановки в зонах влияния геологиче-

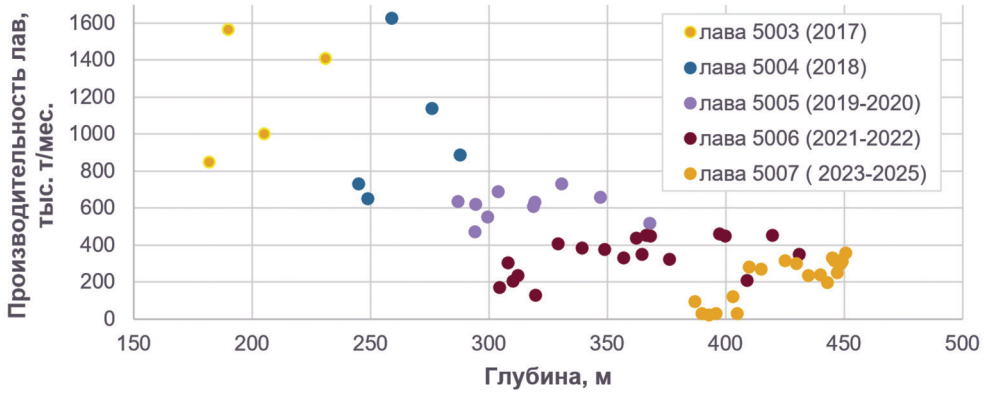

Рис. 1. Влияние глубины горных работ на месячную нагрузку на лавы [составлено авторами]
Fig. 1. Effect of mining depth on monthly longwall productivity [compiled by the authors]

ских нарушений и повышенных проявлений горного давления (ППГД) [12, 13].

Взаимосвязь геомеханических и газодинамических процессов

Фундаментальной характеристикой подземной угледобычи является неразрывная связь геомеханических процессов и метановыделения. Обрушение пород кровли при отработке угольного пласта формирует зоны повышенной трещиноватости и разгрузки, через которые происходит миграция метана из сближенных пластов и вмещающих пород [11]. Расчет дальности влияния подработки определяется через параметры разгрузки M_p, которые зависят от способа управления кровлей, мощности пласта и угла падения [1, 4].

Данные натурных наблюдений на шахтах АО «СУЭК-Кузбасс» и зарубежных шахтах подтверждают: суммарное газовыделение на выемочном участке тесно коррелирует с интенсивностью геомеханических процессов — первичными и вторичными осадками основной кровли, формированием зон опорного давления и разгрузки [2, 11]. Эта взаимосвязь обуславливает необходимость совместного рассмотрения геомеханических и аэрогазодинамических задач при планировании горных работ.

Рис. 2. Уровни зрелости УСМГП [составлено авторами]
Fig. 2. Maturity levels of rock mass management [compiled by the authors]

Концептуальная модель уровней зрелости УСМГП

Методологические основания модели

Предлагаемая модель зрелости УСМГП (см. рис. 2) базируется на следующих методологических принципах. Во-первых, используется аналогия с моделями зрелости, широко применяемыми в управлении проектами и рисками (CMM/CMMI, модели зрелости управления рисками), адаптированная к специфике горного производства [14—16]. Во-вторых, в основу положен принцип расширения масштаба объекта управления: от отдельной выработки к горному отводу в целом. В-третьих, каждый уровень характеризуется комплексом взаимосвязанных параметров: объект управления, подход к принятию решений, типовые задачи, инструментарий и степень интеграции в систему планирования.

Модель (рис. 2) включает три уровня зрелости: оперативный (реактивный), тактический (проактивный) и стратегический (превентивный). Переход между уровнями не является автоматическим — он требует целенаправленных усилий по преодолению организационных, методических, технологических и компетентностных барьеров.

• Уровень 1. Оперативный (реактивный): локальная устойчивость

Объектом управления на данном уровне является отдельная выработка в пределах выемочного участка или блок выемочного столба. Подход к управлению носит реактивный характер: мероприятия по УСМГП разрабатываются и реализуются в ответ на возникающие проблемы или на основе нормативных требований без учета пространственной специфики условий.

Типичные задачи включают: обеспечение устойчивости непосредственной кровли в лаве, управление труднообрушаемой кровлей, обеспечение эксплуатационного состояния участковых выработок, крепление выработок в зонах влияния горных работ [5, 6]. Инструментарий ограничен нормативными расчетами, типовыми паспортами крепления, эмпирическими зависимостями. Интеграция в систему планирования отсутствует: УСМГП сводится к зонированию выработок и выемочных столбов для нужд оперативного планирования.

• Уровень 2. Тактический (проактивный): зональное управление.

Объект управления расширяется до масштаба шахтного поля или его участка. Подход становится проактивным: на основе прогнозных оценок геомеханического состояния массива принимаются решения, предупреждающие возникновение проблем [7].

Типичные задачи: рациональная раскройка шахтного поля с учетом зон повышенного горного давления (ПГД) и ППГД, выбор параметров системы разработки (длина лавы, длина столба, ширина междустолбового целика, порядок подготовки выемочных столбов и количество участковых выработок), минимизация влияния подработки и надработки, отработка защитных пластов [8, 10]. Инструментарий включает численное моделирование НДС массива методом конечных элементов, геологические модели на основе горно-геологических информационных систем (ГГИС), зональные прогнозы газообильности [12, 17, 18]. Интеграция в планирование частичная: результаты геомеханических расчетов учитываются при пространственно-планировочных решениях, но не являются обязательным элементом цикла планирования [19].

• Уровень 3. Стратегический (превентивный): глобальная оптимизация

Объект управления — горный отвод в целом, включая все разрабатываемые и планируемые к разработке пласты. Подход превентивный: управление не-

Матрица критериев оценки уровня зрелости УСМГП [составлено авторами]
Ground control maturity level assessment matrix [compiled by the authors]

Критерий	Уровень 1: Оперативный	Уровень 2: Тактический	Уровень 3: Стратегический
Объект управления	выработка, выемочный участок	шахтное поле, участок	горный отвод, свита пластов
Подход	реактивный	проактивный	превентивный
Интеграция в планирование	отсутствует	частичная	полная (LOM)
Инструменты	нормативные расчеты, эмпирика, ГГИС	численное моделирование, ГГИС	интегрированная цифровая платформа
Горизонт планирования	недели — месяцы	1 — 5 лет	LOM (10+ лет)
Междисциплинарность	разрозненные службы	координация между службами	интегрированная группа
Обратная связь	эпизодическая	периодическая	непрерывный итеративный цикл

определенностью осуществляется на стадии стратегического планирования, когда принимаемые решения определяют условия ведения горных работ на десятилетия [7, 20, 21].

Типичные задачи: районирование горного отвода по комплексу геомеханических и газодинамических факторов, оптимизация порядка отработки пластов в свитах, выбор схемы вскрытия с учетом долгосрочных геомеханических последствий, интеграция стратегии дегазации в LOM-план. Инструментарий требует интегрированных цифровых платформ, обеспечивающих сквозной обмен данными между геологическим моделированием, геомеханическими расчетами, аэрогазодинамическим моделированием и системами планирования горных работ [3, 22, 23]. Интеграция полная: УСМГП становится системообразующим элементом итеративного LOM-планирования.

Матрица оценки уровня зрелости

Для практического применения модели предложена матрица критериев оценки текущего уровня зрелости УСМГП (таблица). Матрица позволяет провести экспресс-диагностику и определить приоритетные направления развития.

Междисциплинарная интеграция и проблема фрагментарности

Четыре домена интеграции

Эффективное УСМГП на тактическом и стратегическом уровнях требует интеграции четырех взаимосвязанных доменов: геологии, технологии, геомеханики и аэрогазодинамики [3]. Геологическое моделирование формирует информационную основу — пространственное распределение свойств пластов и вмещающих пород. Технологические решения (схема вскрытия, параметры системы разработки, раскройка шахтного поля) определяют граничные условия для геомеханических и газодинамических расчетов. Геомеханическое моделирование прогнозирует НДС массива, зоны разгрузки и повышенного давления, которые, в свою очередь, определяют проницаемость техногенных коллекторов и условия миграции метана. Аэрогазодинамическое моделирование оценивает газовыделение на выемочных участках, эффективность дегазации и ограничения по газовому фактору [11, 24].

Разрыв информационной связи в любом звене этой цепочки приводит к системным потерям. Например, если геомеханические расчеты не используют актуальную геологическую модель, прогноз зон ПГД может оказаться неточным, что повлечет ошибки в оценке газовыделения и, как следствие, необоснованные ограничения нагрузки на лаву или, что опаснее, недооценку рисков [18, 25].

Анатомия фрагментарности

Типовой цикл LOM-планирования подземных горных работ на угольных шахтах включает девять последовательных этапов (рис. 3): (1) формирование геологической базы данных; (2) создание горно-геологической модели месторождения; (3) геомеханическое обеспечение; (4) анализ специфики условий и раскройка шахтного поля; (5) расчет технической производительности лав; (6) моделирование дегазации источников метановыделения; (7) моделирование вентиляционных сетей; (8) расчет ограничений по газу; (9) планирование горных работ с учетом ограничений [3].

На практике каждый из этих этапов выполняется с использованием отдельных программных средств (например: Vulcan, Micromine или тНавигатор — для геологии и планирования; Fidesys и/или ANSYS — для геомеханики; tNavigator — для моделирования дегазации; Вентиляция 2.0 — для расчетов вентиляционных сетей; Deswik, XPAC или Spry — для планирования горных работ), различными специалистами, часто без единого формата обмена данными [3, 22]. Результаты одного этапа передаются на следующий в виде отчетов, таблиц или усредненных параметров, что ведет к утрате информации о пространственной изменчивости и неопределенности. Особенно сложно реализовать в таких условиях итеративное планирование с использованием сценарного подхода.

Парадокс компьютерного моделирования

Рост вычислительной мощности и доступности современных программных средств не обеспечивает автоматического повышения качества результатов моделирования. Эффективность моделирования, по нашему мнению, определяется тремя компонентами: качественными исходными данными (вклад — около 50%), правильной настройкой модели (30%) и калибровкой по фактическим данным (20%) [22, 26, 27]. Дефицит любого из компонентов обесценивает результат. Наиболее опасна ситуация, когда современное программное обеспечение применяется с некачественными данными и без калибровки — результат создает иллюзию достоверности при фактически неприемлемой точности.

Это обуславливает необходимость системного сбора геомеханической информации, включая данные мониторинга конвергенции выработок, натурные измерения напряжений, результаты видеоэндоскопии кровли, данные микросейсмического мониторинга [28—30]. Без базы калибровочных данных даже самые совершенные численные модели не могут обеспечить надежного прогноза. Высокие требования предъявляются также к специалистам, осуществляющим такое моделирование.

Итеративная система LOM-планирования

Архитектура итеративного цикла

Переход к стратегическому уровню зрелости УСМГП возможен только в рамках итеративной системы LOM-планирования, объединяющей стадии разведки, проектирования и эксплуатации в единый информационный контур. Цикл включает последовательное вы-

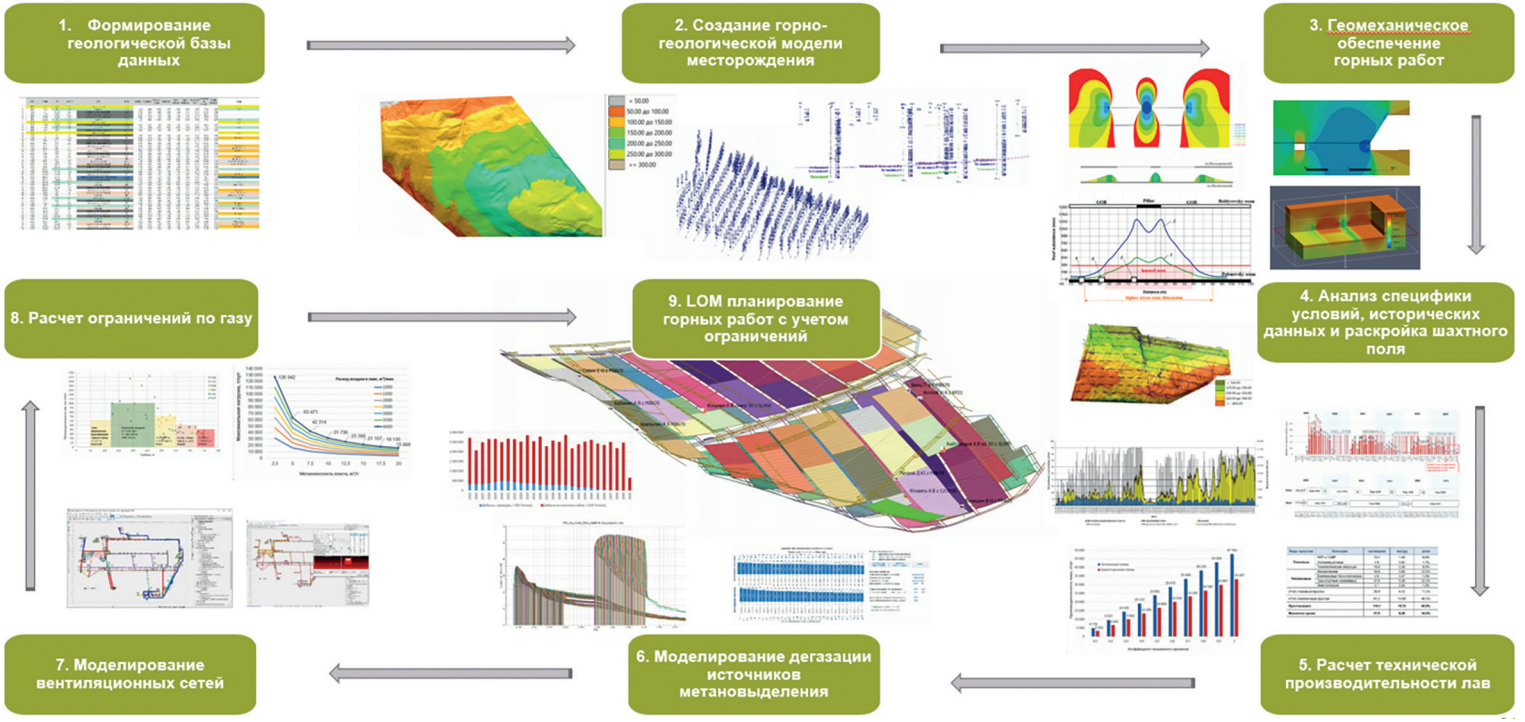

Рис. 3. Цикл LOM-планирования подземных горных работ на угольных шахтах [составлено авторами]
Fig. 3. Underground coal mine LOM planning cycle [compiled by the authors]

полнение девяти этапов (от геологического моделирования до планирования горных работ с учетом ограничений) с обязательной обратной связью: фактические показатели эксплуатации используются для корректировки моделей и планов [3].

Итеративность цикла является принципиальным отличием от традиционного линейного подхода, при котором проект разрабатывается однократно и корректируется лишь при существенных отклонениях. Итеративный подход обеспечивает непрерывное уточнение прогнозов по мере накопления фактических данных эксплуатационной разведки и горных работ [20].

Барьеры перехода и пути преодоления

Идентифицированы четыре основных барьера, препятствующих переходу к более высокому уровню зрелости УСМГП.

Организационный барьер проявляется в разрозненности служб: геологическая, маркшейдерская и технологическая службы функционируют автономно, без единой координации в контексте планирования. Путь преодоления — создание интегрированных групп планирования, включающих специалистов всех профилей [3].

Методический барьер связан с несовершенством существующих методических подходов и недостатком данных для калибровки моделей. Необходим системный сбор геомеханической информации, формирование баз данных натурных наблюдений и разработка отраслевых методик калибровки численных моделей [29, 31 — 33].

Технологический барьер определяется отсутствием единых цифровых платформ, обеспечивающих сквозной обмен данными между этапами планирования. Развитие отечественных программных решений (тНавигатор, Вентиляция 2.0, Fidesys) и их интеграция в единую платформу является стратегической задачей [3, 22, 26].

Компетентностный барьер обусловлен дефицитом междисциплинарных специалистов, способных работать на стыке геологии, геомеханики, аэрогазодинамики и планирования. Преодоление требует модернизации образовательных программ и развития корпоративного обучения [7, 34].

Обсуждение

Предложенная модель уровней зрелости УСМГП согласуется с общемировыми тенденциями развития управления геотехническими рисками в горной промышленности. В австралийской практике подходы к управлению геотехническими рисками также эволюционировали от локальных инженерных решений к системному риск-менеджменту, интегрированному в цикл планирования [4, 14, 35]. Концепция защитной отработки пластов, развитая в работах отечественных исследователей [8, 36], по существу представляет собой элемент тактического и стратегического уровней управления, хотя исторически и не рассматривалась в таком контексте.

Важно подчеркнуть, что экономический эффект перехода к более высокому уровню зрелости реализуется не в экономии на отдельных элементах (выбор более дешевого крепления, сокращение объемов дегазации), а в оптимизации всего цикла производства. Рациональная раскройка шахтного поля с учетом геомеханических ограничений, оптимальный порядок отработки пластов, обеспечивающий эффект разгрузки для дегазации, — эти решения влияют на экономику шахты значительно сильнее, чем локальные оптимизации [3, 7].

Ограничением предложенной модели является ее качественный характер:

переход между уровнями описан концептуально, количественные критерии перехода требуют дальнейшей разработки с привлечением данных по конкретным шахтам. Перспективным направлением развития является формализация модели в виде системы количественных индикаторов зрелости, аналогичной матрицам оценки зрелости управления проектами.

Заключение

1. Управление состоянием массива горных пород в условиях современной подземной угледобычи является не вспомогательной функцией, а системообразующим элементом планирования шахты, определяющим безопасность и экономическую эффективность горных работ на всех горизонтах планирования.

2. Разработана трехуровневая модель зрелости УСМГП: оперативный (реактивный) уровень — обеспечение локальной устойчивости выработок; тактический (проактивный) — зональное управление на уровне шахтного поля; стратегический (превентивный) — глобальная оптимизация на уровне горного отвода в системе LOM-планирования.

3. Предложена матрица критериев для диагностики текущего уровня зрелости УСМГП, включающая восемь параметров: объект управления, подход, интеграция в планирование, инструменты, горизонт планирования, междисциплинарность, обратная связь.

4. Показано, что переход от реактивного к стратегическому управлению требует преодоления четырех барьеров: организационного (создание интегрированных групп планирования), методического (системный сбор данных и калибровка моделей), технологического (развитие интегрированных цифровых платформ) и компетентностного (подготовка междисциплинарных специалистов).

5. Междисциплинарная интеграция геологии, технологии, геомеханики и аэрогазодинамики в рамках итеративного цикла LOM-планирования является необходимым условием достижения стратегического уровня зрелости и обеспечения устойчивой, безопасной и экономически эффективной подземной угледобычи.

Практической рекомендацией является проведение аудита текущего уровня зрелости УСМГП на каждой шахте с использованием предложенной матрицы критериев как первого шага к формированию программы развития системы управления горным массивом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peng S. S.* Longwall mining. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019, 562 p. DOI: 10.1201/9780429260049.

2. *Казанин О. И.*, *Сидоренко А. А.*, *Дребенштедт К.* Интенсивные технологии подземной угледобычи: вызовы и перспективы для угольных шахт России // Acta Montanistica Slovaca. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 60—69. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.05.

3. *Emery J., Canbulat I., Zhang C.* Fundamentals of modern ground control management in Australian underground coal mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 5, pp. 573—582. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.003.

4. *Galvin J. M.* Ground engineering — principles and practices for underground coal mining. Cham: Springer, 2016, 684 p. DOI: 10.1007/978-3-319-25005-2.

5. *Brady B. H.* G., *Brown E. T.* Rock mechanics for underground mining. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.

6. *Mark C., Stephan R. C., Agioutantis Z.* Analysis of mine roof support (AMRS) for US coal mines // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 1899—1910. DOI: 10.1007/s42461-020-00301-x.

7. *Казанин О. И.*, *Ильинец А. А.* Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 41—48. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

8. *Зубов В. П.*, *Тхан Ван Зуи*, *Федоров А. С.* Технология подземной разработки мощных пластов угля с низкими прочностными характеристиками // Уголь. — 2023. — № 5. — С. 41—49. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-41-49.

9. *Kang H., Gao F., Xu G., Ren H.* Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines — A review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 37—65. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.004.

10. *Wang H., Wang J., Elmo D., He M., Ma Z., Gao C.* Ground response mechanism of entries and control methods induced by hard roof in longwall top coal caving panel // Engineering Failure Analysis. 2023, vol. 144, article 106940. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106940.

11. *Wang S., Li X., Wang D.* Mining-induced void distribution and application in the hydro-thermal investigation and control of an underground coal fire // Process Safety and Environmental Protection. 2016, vol. 104, pp. 95—104. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.013.

12. *Konicek P., Waclawik P.* Stress changes and seismicity monitoring of hard coal longwall mining in high rockburst risk areas // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018, vol. 81, pp. 237—251. DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.019.

13. *Mark C.* The science of empirical design in mining rock mechanics // International Journal of Mining Science and Technology. 2016, vol. 26, no. 3, pp. 461—470. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.015.

14. *Joughin W. C.* Managing geotechnical uncertainty and risk in mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2023, vol. 123, no. 11, pp. 515—530. DOI: 10.17159/2411-9717/2990/2023.

15. *Rudakov M., Gridina E., Kretschmann J.* Risk-based thinking as a basis for efficient occupational safety management in the mining industry // Sustainability Switzerland. 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1—14. DOI: 10.3390/su13020470.

16. *Любек Ю. В.*, *Маринина О. А.*, *Цветкова А. Ю.*, *Тесовская С. О.* Формирование организационно-экономической схемы реализации инвестиционных проектов в угольной отрасли с использованием инструментов проектного финансирования // Уголь. — 2026. — № 1. — С. 29—35. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-29-35.

17. *Sinha S., Walton G.* Application of an integrated 3D—2D modeling approach for pillar support design in a Western US underground coal mine // Mining, Metallurgy & Exploration. 2023, vol. 40, pp. 1631—1652. DOI: 10.1007/s42461-023-00832-5.

18. *Liang S.-S., Zhang D.-S., Fan G.-W., Kovalsky E. R., Fan Z.-L., Zhang L., Han X.-S.* Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam // Journal of Central South University. 2023, vol. 30, no. 9, pp. 2948—2965. DOI: 10.1007/s11771-023-5429-y.

19. *Gao F., Stead D., Coggan J.* Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach // Computers and Geotechnics. 2014, vol. 55, pp. 448—460. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.09.020.

20. *Chimunhu P., Topal E.*, *Asad M. W. A.*, *Faradonbeh R. S.*, *Ajak A. D.* The future of underground mine planning in the era of machine learning: Opportunities for engineering robustness and flexibility // Mining Technology. 2024, vol. 133, no. 6. DOI: 10.1177/25726668241281875.

21. *Emery J., Canbulat I., Zhang C., Si G., Ruest M.* Optimization of a coal mine roof characterization model using machine learning // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2024, vol. 183, article 105908. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105908.

22. *Moss A.*, *Kaiser P. K.* An operational approach to ground control in deep mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 67—81. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.05.008.

23. *Coulthard M. A.* Applications of numerical modelling in underground mining and construction // Geotechnique. 1999, vol. 49, no. 3, pp. 415—435. DOI: 10.1680/geot.1999.49.3.415.

24. *Karacan C. Ö.* Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance // International Journal of Coal Geology. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.

25. *Elmo D., Stead D.* The role of behavioural factors and cognitive biases in rock engineering // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, pp. 2109—2128. DOI: 10.1007/s00603-021-02385-3.

26. *Hussain Z., Khan R., Adeel M.* Estimation of floor heave behavior in underground coal mines: numerical and artificial intelligence approaches // International Journal of Coal Science & Technology. 2023, vol. 10, article 56. DOI: 10.1007/s40789-023-00611-5.

27. *Sidorenko A. A., Dmitriyev P. N., Sirenko Y. G.* Predicting Methane Emissions from Multiple Gas-Bearing Coal Seams to Longwall Goafs at Russian Mines // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021, vol. 16, no. 8, pp. 851 — 857.

28. *Данильев С. М., Секерина Д. Д., Данильева Н. А.* Локализация участков развития геомеханических процессов в подземных выработках по результатам трансформационно-классификационного анализа сейсмических данных // Записки Горного института. — 2024. — Т. 266. — С. 260 — 271. DOI: 10.31897/PMI.2024.6.

29. *Беляков Н. А., Морозов К. В., Емельянов И. А.* Методика обработки данных по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 89 — 96. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

30. *Si G., Durucan S., Jamnikar S., Lazar J., Abraham K., Korre A., Shi J.-Q., Zavšek S., Mutke G., Lurka A.* Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams // International Journal of Coal Geology. 2015, vol. 149, pp. 41 — 54. DOI: 10.1016/j.coal.2015.06.016.

31. *Walton G., Sinha S.* Challenges associated with numerical back analysis in rock mechanics // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2022, vol. 14, no. 6, pp. 2058 — 2071. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.01.010.

32. *Tuncay D., Tulu I. B., Klemetti T.* Verification of 3D numerical modeling approach for longwall mines with a case study mine from the Northern Appalachian coal fields // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021, vol. 38, pp. 447 — 456. DOI: 10.1007/s42461-020-00312-8.

33. *Шабаров А. Н., Куранов А. Д.* Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 5 — 10. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.

34. *Литвиненко В. С., Петров Е. И., Василевская Д. В., Яковенко А. В., Наумов И. А., Ратников М. А.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 95 — 111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

35. *Stacey T. R.* A philosophical view on the testing of rock support for rockburst conditions // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2012, vol. 112, pp. 703 — 710.

36. *Государственное* задание FSRW-2026-0003 «Исследование процессов комплексного освоения недр Земли и глубокой переработки георесурсов». ГИАБ

REFERENCES

1. Peng S. S. *Longwall mining*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019, 562 p. DOI: 10.1201/9780429260049.

2. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Drebenstedt C. Intensive underground mining technologies: Challenges and prospects for the coal mines in Russia. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021, vol. 26, no. 1, pp. 60 — 69. [In Russ]. DOI: 10.46544/AMS.v26i1.05.

3. Emery J., Canbulat I., Zhang C. Fundamentals of modern ground control management in Australian underground coal mines. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 5, pp. 573 — 582. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.04.003.

4. Galvin J. M. *Ground engineering — principles and practices for underground coal mining*. Cham: Springer, 2016, 684 p. DOI: 10.1007/978-3-319-25005-2.

5. Brady B. H. G., Brown E. T. *Rock mechanics for underground mining*. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2006. 628 p.

6. Mark C., Stephan R. C., Agioutantis Z. Analysis of mine roof support (AMRS) for US coal mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1899 — 1910. DOI: 10.1007/s42461-020-00301-x.

7. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 41 — 48. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.1.

8. Zubov V. P., van Duy T., Fedorov A. S. Technology of underground mining of thick coal seams with low strength properties. *Ugol'*. 2023, no. 5, pp. 41 — 49. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-41-49.

9. Kang H., Gao F., Xu G., Ren H. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines — A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023, vol. 15, no. 1, pp. 37—65. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.11.004.

10. Wang H., Wang J., Elmo D., He M., Ma Z., Gao C. Ground response mechanism of entries and control methods induced by hard roof in longwall top coal caving panel. *Engineering Failure Analysis*. 2023, vol. 144, article 106940. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106940.

11. Wang S., Li X., Wang D. Mining-induced void distribution and application in the hydro-thermal investigation and control of an underground coal fire. *Process Safety and Environmental Protection*. 2016, vol. 104, pp. 95—104. DOI: 10.1016/j.psep.2016.08.013.

12. Konicek P., Waclawik P. Stress changes and seismicity monitoring of hard coal longwall mining in high rockburst risk areas. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018, vol. 81, pp. 237—251. DOI: 10.1016/j.tust.2018.07.019.

13. Mark C. The science of empirical design in mining rock mechanics. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016, vol. 26, no. 3, pp. 461—470. DOI: 10.1016/j.ijmst.2016.05.015.

14. Joughin W. C. Managing geotechnical uncertainty and risk in mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023, vol. 123, no. 11, pp. 515—530. DOI: 10.17159/2411-9717/2990/2023.

15. Rudakov M., Gridina E., Kretschmann J. Risk-based thinking as a basis for efficient occupational safety management in the mining industry. *Sustainability Switzerland*. 2021, vol. 13, no. 2, pp. 1—14. DOI: 10.3390/su13020470.

16. Lyubek Y. V., Marinina O. A., Tesovskaya S. O. Development of an organizational and economic framework for implementing investment projects in the coal industry using project financing instruments. *Ugol'*. 2026, no. 1, pp. 29—35. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-29-35.

17. Sinha S., Walton G. Application of an integrated 3D—2D modeling approach for pillar support design in a Western US underground coal mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2023, vol. 40, pp. 1631—1652. DOI: 10.1007/s42461-023-00832-5.

18. Liang S.-S., Zhang D.-S., Fan G.-W., Kovalsky E. R., Fan Z.-L., Zhang L., Han X.-S. Mechanical structure and seepage stability of confined floor response to longwall mining of inclined coal seam. *Journal of Central South University*. 2023, vol. 30, no. 9, pp. 2948—2965. DOI: 10.1007/s11771-023-5429-y.

19. Gao F., Stead D., Coggan J. Evaluation of coal longwall caving characteristics using an innovative UDEC Trigon approach. *Computers and Geotechnics*. 2014, vol. 55, pp. 448—460. DOI: 10.1016/j.compgeo.2013.09.020.

20. Chimunhu P., Topal E., Asad M. W. A., Faradonbeh R. S., Ajak A. D. The future of underground mine planning in the era of machine learning: Opportunities for engineering robustness and flexibility. *Mining Technology*. 2024, vol. 133, no. 6. DOI: 10.1177/25726668241281875.

21. Emery J., Canbulat I., Zhang C., Si G., Ruest M. Optimization of a coal mine roof characterization model using machine learning. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2024, vol. 183, article 105908. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105908.

22. Moss A., Kaiser P. K. An operational approach to ground control in deep mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 67—81. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.05.008.

23. Coulthard M. A. Applications of numerical modelling in underground mining and construction. *Geotechnique*. 1999, vol. 49, no. 3, pp. 415—435. DOI: 10.1680/geot.1999.49.3.415.

24. Karacan C. Ö. Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance. *International Journal of Coal Geology*. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.

25. Elmo D., Stead D. The role of behavioural factors and cognitive biases in rock engineering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, pp. 2109—2128. DOI: 10.1007/s00603-021-02385-3.

26. Hussain Z., Khan R., Adeel M. Estimation of floor heave behavior in underground coal mines: numerical and artificial intelligence approaches. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2023, vol. 10, article 56. DOI: 10.1007/s40789-023-00611-5.

27. Sidorenko A. A., Dmitriyev P. N., Sirenko Y. G. Predicting Methane Emissions from Multiple Gas-Bearing Coal Seams to Longwall Goafs at Russian Mines. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021, vol. 16, no. 8, pp. 851—857.

28. Danilev S. M., Sekerina D. D., Danileva N. A. Localization of sites for the development of geomechanical processes in underground workings based on the results of the transformation and classification analysis of seismic data. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 266, pp. 260 — 271. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2024.6.

29. Belyakov N. A., Morozov K. V., Emelyanov I. A. Data processing in full-scale in-situ stress testing by overcoring. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 89 — 96. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.13.

30. Si G., Durucan S., Jamnikar S., Lazar J., Abraham K., Korre A., Shi J.-Q., Zavšek S., Mutke G., Lurka A. Seismic monitoring and analysis of excessive gas emissions in heterogeneous coal seams. *International Journal of Coal Geology*. 2015, vol. 149, pp. 41 — 54. DOI: 10.1016/j.coal.2015.06.016.

31. Walton G., Sinha S. Challenges associated with numerical back analysis in rock mechanics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022, vol. 14, no. 6, pp. 2058 — 2071. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.01.010.

32. Tuncay D., Tulu I. B., Klemetti T. Verification of 3D numerical modeling approach for longwall mines with a case study mine from the Northern Appalachian coal fields. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021, vol. 38, pp. 447 — 456. DOI: 10.1007/s42461-020-00312-8.

33. Shabarov A. N., Kuranov A. D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023, no. 5, pp. 5 — 10. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2023.05.01.

34. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 95 — 111. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

35. Stacey T. R. A philosophical view on the testing of rock support for rockburst conditions. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2012, vol. 112, pp. 703 — 710.

36. *Gosudarstvennoe zadanie FSRW-2026-0003 «Issledovanie protsessov kompleksnogo osvoeniya nedr Zemli i glubokoy pererabotki georesursov»* [State assignment FSRW-2026-0003 «Research of the processes of complex development of the Earth's subsoil and deep processing of georesources»].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сидоренко Андрей Александрович — канд. техн. наук,
главный эксперт по планированию подземных горных работ,
АО «СУЭК», e-mail: SidorenkoAA@suek.ru,
Сидоренко Сергей Александрович — канд. техн. наук,
доцент, Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
e-mail: Sidorenko_SA@pers.spmi.ru.
Для контактов: Сидоренко А.А., e-mail: SidorenkoAA@suek.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Sidorenko, Cand. Sci. (Eng.), Chief Expert
for Underground Mining Planning, JSC «SUEK»,
Moscow, Russia, e-mail: SidorenkoAA@suek.ru,
S.A. Sidorenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia,
e-mail: Sidorenko_SA@pers.spmi.ru
Corresponding author: A.A. Sidorenko, e-mail: SidorenkoAA@suek.ru.

Получена редакцией 19.12.2025; получена после рецензии 11.01.2026; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 19.12.2025; received after the review 11.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.