Центр под эгидой ЮНЕСКО

Международный центр компетенций в горнотехническом образовании под эгидой ЮНЕСКО

Статья подготовлена при содействии АНО «Международный центр компетенций в горнотехническом образовании» под эгидой ЮНЕСКО

ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень / MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2025;(12-2):153-165
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.83 DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_153

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК

Е.Н. Грищенкова[1], К.В. Морозов[1], В.А. Носков[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: ekgr.mail@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены вопросы, связанные с геомеханическим сопровождением разработки месторождений. Предложен новый подход к оценке геомеханических условий, основанный на использовании интегрального показателя на базе нормированных геолого-технологических параметров, при котором влияние каждого из факторов определяется посредством экспертной оценки. Описана адаптивная математическая модель оценки влияния факторов, целевым параметром которой служит интегральный показатель геомеханических условий. В рамках модели реализованы механизмы анализа чувствительности, позволяющие количественно определить вклад каждого параметра, а также сценарного моделирования, обеспечивающего оценку изменений геомеханического состояния при варьировании входных данных. Данное решение позволяет осуществлять комплексное исследование воздействия различных комбинаций факторов на устойчивость выработок и производить экспериментальную проверку гипотез о влиянии параметров. Сравнительный анализ распределения значений интегрального показателя геомеханических условий на различных участках выработок дает возможность выявить зоны, требующие особого внимания в целях дальнейшей разработки мероприятий по повышению безопасности. Впоследствии планируется реализация модели в виде прикладного инструмента для инженерного анализа и поддержки принятия решений в горной промышленности.

Ключевые слова: геомеханика, интегральный показатель геомеханических условий, экспертная оценка, аналитическая система, весовые коэффициенты, устойчивость выработок.

Для цитирования: *Грищенкова Е. Н., Морозов К. В., Носков В. А.* Разработка методики экспертной оценки влияния горнотехнических факторов на устойчивость подземных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 12-2. – С. 153–165. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_153.

© Е.Н. Грищенкова, К.В. Морозов, В.А. Носков. 2025.

Development of a methodology for expert assessment of the impact of mining factors on the stability of underground workings

E.N. Grishchenkova[1], K.V. Morozov[1], V.A. Noskov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: ekgr.mail@gmail.com

Abstract: The issues related to geomechanical support of field development are considered. A new approach to the assessment of geomechanical conditions is proposed, based on the use of an integral indicator based on standardized geological and technological parameters, in which the influence of each factor is determined by expert assessment. An adaptive mathematical model for assessing the influence of factors is described, the target parameter of which is an integral indicator of geomechanical conditions. The model implements sensitivity analysis mechanisms that allow quantifying the contribution of each parameter, as well as scenario modeling that provides an assessment of changes in the geomechanical state with varying input data. This solution allows for a comprehensive study of the effects of various combinations of factors on the stability of workings and an experimental verification of hypotheses about the influence of parameters. A comparative analysis of the distribution of the values of the integral indicator of geomechanical conditions in various mining sites makes it possible to identify areas that require special attention in order to further develop measures to improve safety. Subsequently, it is planned to implement the model as an application tool for engineering analysis and decision support in the mining industry.

Key words: geomechanics, integral indicator of geomechanical conditions, expert assessment, analytical system, weighting factors, stability of workings.

For citation: Grishchenkova E. N., Morozov K. V., Noskov V. A. Development of a methodology for expert assessment of the impact of mining factors on the stability of underground workings. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(12-2):154-165. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_122_0_154.

Введение

С каждым годом актуальность проблем, связанных с геомеханическим сопровождением разработки месторождений, только усиливается [1—3]. Объясняется это вполне понятными причинами: увеличение глубины ведения горных работ как для открытых [4—6], так и для подземных условий [7—9], вовлечение в отработку все более бедных месторождений с усложняющимися горно-геологическими условиями [10—12], накопление больших масс пород в отвалах [13, 14] и хвостохранилищах [15], все более активное вовлечение в отработку месторождений под водными объектами, городскими агломерациями и др. [16—18].

Проблема геомеханической оценки условий отработки возникла одновременно с зарождением горного дела. Изначально подобные оценки основывались на моно-критериях, таких как тип породы (литологический состав) или ее способность сопротивляться внешним нагрузкам (прочность, несущая способность). С середины 70-х годов XX в. начали активно использоваться такие достаточно сложные критерии, как рейтинговые показатели (Лобшир, Бенявский, Бартон), применяемые в условиях угольных и рудных месторождений. Ос-

новой данных классификаций является комплексная оценка систем трещиноватости скальных массивов, выраженная в условных единицах, которая позволяет оценить склонность пород к разрушениям и устойчивость горных выработок [19 — 21].

Несмотря на активное использование рейтинговых систем в современной геомеханике [22 — 24], их применение в ряде случаев, например в отработке соляных месторождений, достаточно проблематично [25, 26]. Кроме того, современное состояние информационного обеспечения позволяет использовать при оценке геомеханических условий значительные массивы разноплановой информации, накопленной за время освоения месторождения [27 — 29]. Появилось целое направление, объединенное названием Geohazard Risk Management, включающее распознавание и картирование геологических опасностей (Geohazard Recognition & Hazard Mapping), оборудование и методики геотехнического мониторинга (Instrumentation & Monitoring), оценку и контроль риска (Risk Assessment & Risk Control) и др. [30 — 32].

Увеличение глубины разработки и усложнение горно-геологических условий сопровождаются повышением уровня горного давления, неоднородной анизотропией массива, влиянием техногенных факторов, что приводит к усилению неопределенности в инженерных расчетах. Возрастает потребность в подходах, которые позволят интегрировать в едином пространстве разнотипные источники данных и перевести их в сопоставимую безразмерную форму для проведения аналитики.

При этом экспертное знание продолжает оставаться ядром инженерной практики в геомеханике и горном деле, так как именно оно обеспечивает постановку задачи, корректный выбор параметров и интерпретацию результатов. Это является предпосылкой к созданию гибридных решений, основанных на формализованных экспертных оценках, что позволяет объединить преимущества традиционных рейтинговых классификаций и современных аналитических моделей.

Авторами статьи оценку геомеханических условий отработки месторождений предлагается проводить с помощью безразмерного параметра (назовем его G_i — интегральный показатель геомеханических условий), представляющего собой сумму нормированных величин, характеризующих разноплановые геолого-технологические условия с учетом экспертной оценки их влияния. Экспертная оценка может быть осуществлена как методами опроса специалистов, имеющих опыт освоения исследуемого типа месторождений, так и при использовании машинного обучения [33 — 35].

Предлагаемый интегральный показатель G_i представляет собой емкую и расширяемую конструкцию, способную аккумулировать влияние множества факторов без жесткой привязки к типу месторождения. Благодаря модульной структуре модель допускает гибкую перенастройку весов под различный геолого-технологический контекст. Кроме того, модель изначально ориентирована на возможность расширения функционала за счет внедрения механизмов анализа чувствительности и сценарного моделирования, что позволит повысить адаптивность расчетов и обеспечить более полное описание изменения геомеханических условий во времени. Практическая эффективность модели зависит от качества организации и обработки исходных данных. Соблюдение единого порядка их подготовки формирует устойчивую методическую базу, которую можно расширять за счет интеграции с системами мониторинга и последую-

щей калибровки параметров по историческим данным.

В статье описаны подходы и первые результаты, полученные авторами при оценке геомеханических условий отработки месторождений.

Математическая модель оценки влияния параметров

Разрабатываемый подход базируется на адаптивной математической модели, учитывающей влияние факторов через систему настраиваемых весовых коэффициентов, что обеспечивает гибкость анализа применительно к различным горно-геологическим условиям.

Исходными данными для анализа служит комплекс геолого-технических данных, аккумулированных специализированным ПО, используемым на предприятии и включающим набор параметров, которые характеризуют совокупность условий участка месторождения: глубину отработки, параметры системы разработки (размеры выработок и целиков), прочностные и деформационные свойства массива пород, параметры напряженного состояния, дату проходки выработок, содержание нерастворимого остатка, мощности пластов, коржей и междупластья, факт наличия закладки (есть/нет).

Для повышения достоверности анализа и минимизации влияния локальных аномалий предусмотрена процедура пространственной агрегации данных с использованием регулярной сетки. Методология агрегации включает округление координат до узлов сетки с последующим расчетом медианных значений для количественных показателей и определением модальных значений для категориальных переменных. Особое внимание уделяется сохранению пространственных закономерностей распределения параметров после агрегации. В результате проведенной обработки объем данных сокращается на 50—80% в зависимости от настроек, задаваемых пользователем; при этом ключевые статистические характеристики массива данных остаются репрезентативными.

Модель учитывает влияние различных факторов через систему весовых коэффициентов. Интегральный показатель геомеханических условий G_i вычисляется как взвешенная сумма нормализованных параметров:

$$G_i = \sum_{j=1}^{n} \left(\omega_j \cdot \tilde{x}_j \right), \qquad (1)$$

где $G_i \in [0, 1]$ — интегральная оценка геомеханических условий; n — количество учитываемых параметров; $\omega_j \in [0; 1]$ — весовой коэффициент j-го параметра; удовлетворяющий условию $\sum_{j=1}^{n} \omega_j = 1$; $\tilde{x}_j \in [0; 1]$ — нормализованное значение j-го параметра.

Приведение разнородных показателей к единой безразмерной шкале [0,1] осуществляется с использованием минимаксного преобразования, описываемого следующим математическим выражением:

$$\tilde{x}_j = \frac{x_j - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \qquad (2)$$

где $\tilde{x}_j$ $j \in [0,1]$ — нормализованное значение j-го наблюдения; x_j — исходное значение параметра; $\min(x) = \min\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ — минимальное значение параметра в выборке; $\max(x) = \max\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ — максимальное значение параметра в выборке; n — объем выборки.

Подход к преобразованию значений определяется характером влияния факторов на устойчивость выработок. Часть показателей характеризуется прямой зависимостью («чем больше значение, тем больше риски»), например, время стояния выработки, степень нагружения, напряженное состояние, изоглубина.

Другие же показатели имеют обратную зависимость («чем меньше значение, тем больше риски»), например, прочностные характеристики, мощностные показатели, нерастворимый остаток. К показателям с прямой зависимостью применяется обычная нормализация; группа параметров с обратной зависимостью подвергается также инверсному преобразованию:

$$\tilde{x}_j^* = 1 - \tilde{x}_j . \qquad (3)$$

Параметр «Факт закладки» выражается в бинарной форме, где значению «Заложено» соответствует значение «1», а «Не заложено» — «0». Для частного случая учета фактора закладки $Z \in \{0,1\}$ модификация весового коэффициента ω_k параметра «Напряжение» выражается как

$$\omega'_k = [1 - p \cdot Z] \cdot \omega_k, \qquad (4)$$

где p — коэффициент уменьшения влияния параметра «Напряжение», устанавливаемый пользователем.

Данная модель обеспечивает выполнение следующих условий:

$G_i = 0$ — минимальное значение интегрального показателя геомеханических условий;

$G_i = 1$ — максимальное значение интегрального показателя геомеханических условий;

$\frac{\partial R}{\partial \tilde{x}_j} = \omega_j$ — чувствительность модели к изменению параметров;

$\sum \omega_j = 1$ — условие нормировки весовых коэффициентов.

Для обеспечения корректности расчетов модель сопровождается процедурой валидации весовых коэффициентов. Математический контроль обеспечивает выполнение основного условия $|\sum \omega_j - 1| \leqslant 0{,}1$, гарантирующего корректность весовых коэффициентов. В рамках теоретической интерпретации возможны три сценария:

- точное соблюдение условия ($\sum \omega_j = 1$) свидетельствует о сбалансированности модели;
- значение суммы меньше единицы ($\sum \omega_j < 1$) указывает на недоучет факторов;
- превышение единицы ($\sum \omega_j > 1$) трактуется как потенциальная переоценка отдельных параметров.

Механизм задания весовых коэффициентов реализует принцип сочетания экспертных знаний с формализованными процедурами расчета. На начальном этапе используется метод анализа иерархий, позволяющий количественно отразить представления специалистов о значимости факторов. Экспертами проводятся парные сравнения параметров по шкале относительной важности, после чего вычисляются собственные векторы при условии согласованности матрицы сравнений. Полученные значения нормируются и формируют начальный вектор весов, задающий относительный вклад каждого параметра в интегральную оценку.

Для уточнения весов в процессе эксплуатации модели предусмотрена автоматическая калибровка, которая заключается в итеративной корректировке коэффициентов на основе накопленных данных наблюдений, например, при сопоставлении рассчитанных значений G_i с фактическими показателями устойчивости выработок.

С методологической точки зрения G_i рассматривается как интегральная мера геомеханической устойчивости, где значения, близкие к нулю, соответствуют благоприятным условиям, а приближение к единице отражает рост потенциальных рисков. В практических целях можно использовать условные диапазоны интерпретации:

- $G_i < 0{,}3$ — устойчивое состояние;
- $0{,}3 \leqslant G_i < 0{,}6$ — зона повышенного внимания;

• $G_i \geq 0{,}6$ — потенциально неустойчивое состояние, требующее детального анализа.

Интегральный показатель не только объединяет разнородные факторы, но и формирует удобную количественную шкалу для принятия инженерных решений от планирования профилактических мероприятий до обоснования необходимости корректировки параметров системы разработки.

Анализ чувствительности и сценарное моделирование

Разработанная модель допускает проведение анализа чувствительности, позволяющего количественно оценить влияние отдельных параметров на интегральный показатель геомеханических условий G_i. При этом чувствительность каждого параметра S_j определяется как производная по нормализованному значению:

$$S_j = \frac{\partial G_j}{\partial x_j} = \omega_j, \qquad (5)$$

где ω_j — весовой коэффициент параметра x_j, отражающий его относительную значимость в модели.

Для более детального анализа может быть использован относительный коэффициент чувствительности:

$$E_j = \omega_j \frac{x_j}{G_j}, \qquad (6)$$

характеризующий изменение интегрального показателя при малом относительном изменении входного параметра.

Данный подход позволяет выявлять как наиболее критичные параметры, так и диапазоны, в которых изменения условий оказывают существенное влияние на устойчивость.

Сценарное моделирование (анализ типа «что — если») осуществляется путем замены исходного вектора параметров X на гипотетический X', соответствующий предполагаемой производственной ситуации, сопряженной с риском. Расчет производится по формуле:

$$G_i' = \sum_{j=1}^{n} \omega_j \cdot x_j', \quad \Delta G_i = G_i' - G_i. \qquad (7)$$

Разность ΔG_i отражает количественную оценку изменения уровня геомеханического риска при заданном сценарии, что позволяет обосновывать проектные решения и оценивать эффективность мероприятий, направленных на ликвидацию риска.

Практическая реализация анализа чувствительности предусматривает построение ранговых диаграмм влияния параметров, где значения коэффициентов S_j или E_j нормируются относительно максимального. Это позволяет наглядно выделить наиболее значимые факторы, определяющие устойчивость выработок. Как правило, к ним относятся параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние, геометрию выработок и физико-механические свойства пород.

При интерпретации результатов важно учитывать, что высокая чувствительность не всегда означает непосредственную причину потери устойчивости: фактор может иметь опосредованное влияние через коррелированные параметры. В связи с этим рекомендуется проведение развернутого анализа, с оценкой не только отдельных весов, но и их совокупного воздействия. Для таких целей могут быть использованы матрицы чувствительности, где каждая ячейка отражает изменение G_i при совместной вариации двух факторов.

Полученные значения ΔG_i могут использоваться для классификации сценариев по степени риска. Например:

$\Delta G_i < 0{,}05$ — изменения условий несущественны;

$0{,}05 \leq \Delta G_i < 0{,}15$ — умеренное влияние, требующее локального контроля;

$\Delta G_i \geq 0{,}15$ — высокая чувствительность, требующая корректировки проектных решений.

Визуализация анализа чувствительности в виде тепловых карт облегчает выявление факторов, оказывающих максимальное воздействие на интегральный показатель. Эти результаты могут применяться при оптимизации систем разработки, выборе схем закладки и корректировке эксплуатационных параметров.

Практическая реализация и интерпретация результатов

Практическая реализация разработанной методики предполагает интеграцию модели в корпоративные системы геомеханического мониторинга и анализа. Расчет показателя G_i может выполняться автоматически при поступлении новых данных с датчиков напряжений, сейсмоакустических станций или результатов инструментального контроля, что обеспечивает возможность регулярного обновления карт устойчивости и выделения зон риска.

Визуализация распределения G_i на плане или в трехмерной модели массива позволяет инженерам быстро локализовать участки потенциальной нестабильности и принимать корректирующие меры до возникновения критических событий. В данном случае модель служит связующим звеном между аналитическим прогнозом и системой управления безопасностью горных работ.

Для внедрения методики в производственный контур целесообразно реализовать трехэтапную схему. На первом этапе производится подготовка исходных данных: унификация форматов, проверка корректности пространственных координат и интеграция результатов геомеханических обследований с технологическими показателями. На втором этапе формируется обучающая база и производится калибровка весовых коэффициентов по историческим наблюдениям, что позволяет адаптировать модель под специфику конкретного объекта. На третьем этапе осуществляется интеграция алгоритма в программно-аппаратный комплекс предприятия, что обеспечивает автоматическое обновление расчетов G_i при поступлении новых данных мониторинга.

Реализация данного подхода открывает возможности для перехода от статической оценки к динамическому мониторингу состояния массива; при этом инженерам доступно отслеживание изменений показателя G_i во времени, фиксация отклонений от нормативных диапазонов и оперативные корректировки технологических параметров в целях снижения рисков.

Модель также может использоваться в составе систем поддержки принятия решений для выбора оптимальных параметров закладки, последовательности проходки или направления выемочных работ.

Наличие формализованного индикатора устойчивости облегчает взаимодействие между проектными и эксплуатационными службами, обеспечивая единый критерий оценки геомеханического состояния массива в режиме реального времени.

Перспективным направлением практического применения является использование показателя G_i в составе цифровых двойников участков месторождений. На основе пространственно-временных распределений интегрального показателя можно формировать динамические карты геомеханической устойчивости, которые служат инструментом прогноза и раннего оповещения. Включение модели в единый цифровой контур предприятия позволяет не только оперативно отслеживать состояние массива, но и проводить ретроспективный анализ

причин возникновения неустойчивости. Это делает модель полезной не только для текущего контроля, но и для планирования профилактических мероприятий, оценки эффективности закладки и оптимизации технологических параметров.

Заключение и перспективы развития

Представленная математическая модель позволяет проводить комплексное изучение влияния различных комбинаций факторов на устойчивость горных выработок, устанавливая количественные зависимости между параметрами массива и интегральным показателем геомеханических условий, что открывает новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований. Важной особенностью является возможность экспериментальной верификации научных гипотез относительно значимости отдельных параметров благодаря варьированию весовых коэффициентов. Математическая модель может быть адаптирована под специфические условия конкретных месторождений и производственные задачи.

В практической деятельности горных предприятий данное решение может служить инструментом поддержки принятия технических решений. Модель обеспечивает научно обоснованный подход к проектированию, позволяя оценивать риски на этапе планирования.

Научная новизна предложенного подхода заключается в разработке универсального интегрального критерия, объединяющего экспертные и количественные методы анализа.

В отличие от традиционных рейтинговых систем, предложенная модель обладает адаптивностью и возможностью уточнения параметров за счет включения процедур калибровки весов и анализа чувствительности. Это позволяет формировать динамическое представление о геомеханическом состоянии массива и выявлять тенденции его изменения задолго до проявления признаков неустойчивости. Практическая ценность модели заключается в повышении точности оценки рисков и создании инструментов, которые могут быть интегрированы в цифровые двойники горных предприятий и платформы промышленной аналитики [36 — 38].

Перспективы развития модели включают несколько стратегических направлений, в том числе добавление новых факторов, учитывающих специфические условия различных типов месторождений, динамическое обновление данных благодаря подключению к системам мониторинга в реальном времени, интеграция с системами ГИС, расширенная аналитика за счет добавления методов машинного обучения для выявления скрытых закономерностей и прогнозирования развития опасных ситуаций. Дальнейшие исследования будут способствовать повышению безопасности и эффективности ведения горных работ в различных геолого-технологических условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сидоров Д. В.*, *Пономаренко Т. В.* Методология оценки геодинамического состояния природно-техногенных систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 49 — 52. DOI: 0.17580/gzh.2020.01.09.

2. *Барях А. А.*, *Санфиров И. А.*, *Дьяконов М. В.*, *Лобанов С. Ю.*, *Никифорова А. И.* Информационное обеспечение геомеханических расчетов устойчивости подработанного породного массива со сложным тектоническим строением // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — № 1. — С. ES1005. DOI: 10.2205/2024ES000894.

3. *Жерлыгина Е. С.*, *Куранова М. Е.*, *Гусев В. Н.*, *Одинцов Е. Е.* Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород // Горная промышленность. — 2025. — № 1. — С. 162—169. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169.

4. *Ponomarenko M. R.*, *Kutepov Y. I.* Mining complexity assessment to substantiate deformation monitoring at open pit mines // Journal of Mining Science. 2021, vol. 6, pp. 986—994. DOI: 10.1134/S1062739121060119.

5. *Гладков И. В.*, *Якунчиков Е. Н.*, *Румянцев А. Е.*, *Соннов М. А.* Моделирование влияния открытых горных работ на состояние нижележащего массива при планировании отработки подземным способом с применением программного комплекса CAE FIDESYS // Горная промышленность. — 2024. — № 4. — С. 165—172. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-165-172.

6. *Захаров В. Н.*, *Федотенко В. С.*, *Ефремовцев Н. Н.* Исследование техногенного воздействия взрывных работ при открытой разработке месторождений угля // Уголь. — 2023. — № 12. — С. 73—79. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-73-79.

7. *Куликова Е. Ю.*, *Полянкин А. Г.*, *Потокина А. М.* Специфика управления геотехническими рисками при проектировании подземных сооружений // Записки Горного института. — 2023. — Т. 264. — С. 895—905.

8. *Зубов В. П.*, *Сокол Д. Г.* Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2023. — Т. 264. — С. 874—885.

9. *Багаутдинов И. И.*, *Шабаров А. Н.*, *Локтюкова О. Ю.* Горные удары и их связь с геолого-структурными особенностями массива // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 53—60. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.08.

10. *Шабаров А. Н.*, *Смирнов Э. В.* Методические принципы прогноза опасных природных процессов на основе геодинамического районирования недр // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 11-1. — С. 157—170. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_157.

11. *Кирсанов А. К.*, *Вохмин С. А.*, *Бархатов Д. В.* Оценка рисков при подготовке к разработке месторождения на глубоких горизонтах (на примере шахты «Глубокая» рудника «Скалистый») // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2025. — № 1. — С. 66—77.

12. *Яковлев В. Л.*, *Глебов А. В.*, *Журавлев А. Г.*, *Жариков С. Н.*, *Шимкив Е. С.* Методологические аспекты переходных процессов при формировании горнотехнических систем глубоких карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 6. — С. 85—97. DOI: 10.15372/FTPRPI20240610.

13. *Кутепова Н. А.*, *Кутепов Ю. И.*, *Кудашов Е. С.*, *Данильев С. М.* Изучение прочности фосфогипса с примесями нефелинового шлама в конструкциях ограждающих дамб гипсонакопителей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 10. — С. 67—78. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78.

14. *Иванов С. В.* О возможностях использования горнопромышленных отходов в Мурманской области // Известия Коми Научного центра УрО РАН. — 2023. — № 3 (61). — С. 79—85. DOI: 10.19110/1994-5655-2023-3-79-85.

15. *Радченко Д. Н.*, *Хайдаров И. В.*, *Залевская К. Н.* Обоснование технологии добычи и переработки техногенного сырья Новотроицкого хвостохранилища // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 1. — С. 277—289. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-277-289.

16. *Смирнова А. Д.*, *Федотов Г. С.*, *Михайлова Т. В.* Геологическое моделирование участка Тутуясской площади Кузбасса в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond // Уголь. — 2024. — № 6. — С. 119—124. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-119-124.

17. *Еременко А. А.*, *Копытов А. И.*, *Филиппов В. Н.*, *Волков А. В.* Оценка геодинамического состояния массива горных пород при взрывной отбойке рудных запасов на участках Таштагольского и Шерегешевского месторождений // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2023. — № 3 (157). — С. 70—78. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-3-70-78.

18. *Исаченко А. А.* Этапы подготовки проектных решений при отработке угольных сложноструктурных месторождений подземным способом // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2023. — № 9. — С. 77—83.

19. *Указания* по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим—Усольский Калийный комбинат». Введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. — Пермь; Березники, 2014. — 130 с.

20. *Евсеев А. В.* Организация регулярного инструментального контроля несущих элементов системы разработки на рудниках ВКМКС // Горное эхо. — 2020. — № 3 (80). — С. 36—39. DOI: 10.7242/echo.2020.4.7.

21. *Ломакин И. С.*, *Цаюков А. А.*, *Евсеев А. В.* Физическое и математическое моделирование процесса деформирования и разрушения междукамерных целиков // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2021. — № 1. — С. 47—53. DOI: 10.7242/2658-705X/2021.1.4.

22. *Киселев В. А.*, *Гусева Н. В.* Районирование территории трасс трубопроводов по степени опасности возникновения аварий средствами геоинформационных систем и искусственных нейронных сетей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 10-2. — С. 185—192. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_185.

23. *Басаргин А. А.*, *Сацюк А. В.*, *Чеджемов С. Р.* Применение пространственного геологического моделирования для оценки минеральных ресурсов медного месторождения Удоканское Читинской области // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 988—999. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-988-999.

24. *Носков В. А.*, *Бадтиев Б. П.*, *Павлович А. А.* Риск-менеджмент при ведении открытых горных работ // Горный журнал. — 2020. — № 2. — С. 51—55. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.06.

25. *Рыбак Я.*, *Хайрутдинов М. М.*, *Кузиев Д. А.*, *Конгар-Сюрюн Ч. Б.*, *Бабырь Н. В.* Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 61—70. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

26. *Паньков И. Л.*, *Аникин В. В.*, *Бельтюков Н. Л.*, *Евсеев А. В.*, *Кузьминых В. С.*, *Ломакин И. С.*, *Морозов И. А.*, *Токсаров В. Н.*, *Ударцев А. А.* Изучение деформирования и разрушения соляных пород для разработки методов геомеханической оценки устойчивости грузонесущих элементов камерной системы разработки калийных месторождений // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. — 2022. — № 3. — С. 14—24. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.3.2/.

27. *Матерова Е. С.*, *Аксенова Ж. А.*, *Шарафуллина Р. Р.*, *Галимова Г. А.*, *Шилов М. Л.* Цифровизация деятельности российских компаний горнодобывающей отрасли // Уголь. — 2024. — № 11. — С. 117—121. DOI: 10.18796/0041-57902024-11-117-121.

28. *Рыльникова М. В.*, *Цупкина М. В.*, *Кирков А. Е.* Технологии сбора и обработки больших данных — основа повышения достоверности первичной информации о массивах горных пород при освоении месторождений полезных ископаемых и техногенных образований // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2023. — № 1-1. — С. 308—327. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-308-327.

29. *Писецкий В. Б.*, *Лапин С. Э.* К решению проблемы дистанционного прогноза объектов с риском развития опасных геодинамических явлений в процессе ведения подземных горных работ // Безопасность труда в промышленности. — 2025. — № 1. — С. 90—95. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-90-95.

30. *Сидоров Д. В.*, *Пономаренко Т. В.* Применение цифровых геомеханических двойников для прогнозирования и оценки рисков потери запасов в проектах разработки рудных месторождений // Горная промышленность. — 2022. — № 3. — С. 112—117. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-112-117.

31. *Qin X. S.*, *Cao H.*, *Guo L. J.* Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.

32. *Suorineni F. T.*, *Mgumbwa J. J.*, *Kaiser P. K.*, *Thibodeau D.* Mining of orebodies under shear loading. Part 2. Failure modes and mechanisms // Mining Technology. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 240—249. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000072.

33. *Егоров Н. А.*, *Фокин И. В.*, *Дубиня Н. В.* Прогноз поведения напряженно-деформируемого состояния образцов горных пород при помощи рекуррентной нейронной сети // Наука и технологические разработки. — 2024. — Т. 103. — № 2. — С. 59—74. DOI: 10.21455/std2024.2-4.

34. *Неверов С. А.*, *Неверов А. А.*, *Конурин А. И.*, *Адылканова М. А.*, *Орлов Д. В.* Применение нейронных сетей для определения изменения напряжений в массиве пород методом фотоупругости // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 6. — С. 176—189. DOI: 10.15372/FTPRPI20230616.

35. *Федоров А. И.*, *Кузнецов С. А.*, *Ардисламова Д. Р.*, *Давлетова А. Р.*, *Хакимов А. А.* Использование методов кластеризации по механическим свойствам для расчета напряженного состоя-

ния на участке Северо-Комсомольского месторождения // Экспозиция Нефть Газ. — 2025. — № 2 (112). — С. 65—70. DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-65-70.

36. *Yuxin Wang, Alireza Rezaei, Stephen Hicks* Digital twin applications in geotechnical engineering: a systematic review // Machine Learning and Data Science in Geotechnics. 2025, vol. 1, no. 1, pp. 77—91. DOI: 10.1108/MLAG-02-2025-0005.

37. *Pouya Nobahar, Chaoshui Xu, Peter Dowd, Roohollah Shirani Faradonbeh* Exploring digital twin systems in mining operations: A review // Green and Smart Mining Engineering. 2024, vol. 1, no. 4, pp. 474—492. DOI: 10.1016/j.gsme.2024.09.00.

38. *Xiong Wang, Yue Pan, Jinjian Chen* Digital twin with data-mechanism-fused model for smart excavation management // Automation in Construction. 2024, vol. 168, part A. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105749. ГИАБ

REFERENCES

1. Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Methodology of assessment of geodynamic state of natural-technogenic systems in the implementation of field development projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 49—52. [In Russ]. DOI: 0.17580/gzh.2020.01.09.

2. Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Dyakonov M. V., Lobanov S. Y., Nikiforova A. I. Information support for geomechanical calculations of the stability of a mined-out rock mass with a complex tectonic structure. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, vol. 24, no. 1, pp. ES1005. [In Russ]. DOI: 10.2205/2024ES000894.

3. Zherlygina E. S., Kuranova M. E., Gusev V. N., Odintsov E. E. Identification of hazardous areas based on the study of technogenic cracks in rock masses. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 162—169. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-162-169.

4. Ponomarenko M. R., Kutepov Y. I. Mining complexity assessment to substantiate deformation monitoring at open pit mines. *Journal of Mining Science*. 2021, vol. 6, pp. 986—994. DOI: 10.1134/S1062739121060119.

5. Gladkov I. V., Yakunchikov E. N., Rumyantsev A. E., Sonnov M. A. Modeling the impact of open-pit mining on the state of the underlying rock mass when planning underground mining using the CAE Fidesys software package. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 4, pp. 165—172. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-4-165-172.

6. Zakharov V. N., Fedotenko V. S., Efremovtsev N. N. Study of the Technogenic Impact of Blasting Operations in Open-Pit Coal Mining. *Ugol'*. 2023, no. 12, pp. 73—79. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-12-73-79.

7. Kulikova E. Y., Polyankin A. G., Potokina A. M. Specifics of geotechnical risk management in the design of underground structures. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 895—905. [In Russ].

8. Zubov V. P., Sokol D. G. Technologies for intensive development of potash seams by longwall mining at great depths: current problems and improvement directions. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 264, pp. 874—885. [In Russ].

9. Bagautdinov I. I., Shabarov A. N., Loktyukhova O. Y. Rockbursts and their relation to geological and structural features of the rock mass. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 53—60. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.08.

10. Shabarov A. N., Smirnov E. V. Methodological principles for forecasting hazardous natural processes based on geodynamic zoning of the subsurface. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 11-1, pp. 157—170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_111_0_157.

11. Kirsanov A. K., Vokhmin S. A., Barkhatov D. V. Risk assessment in preparation for deep-level deposit mining (case study: «Glubokaya» shaft, «Skalistyy» mine). *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2025, no. 1, pp. 66—77. [In Russ].

12. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Zhuravlev A. G., Zharikov S. N., Shimkiv E. S. Methodological aspects of transitional processes in the formation of mining systems in deep open pits. *Journal of Mining Sciences*. 2024, no. 6, pp. 85—97. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20240610.

13. Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S., Daniliev S. M. Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 10, pp. 67—78. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-67-78.

14. Ivanov S. V. On the possibilities of using mining and industrial waste in the Murmansk region. *Proceedings of the Komi Science centre Ural branch Russian academy of sciences*. 2023, no. 3 (61), pp. 79—85. [In Russ]. DOI: 10.19110/1994-5655-2023-3-79-85.

15. Radchenko D. N., Khaydarov I. V., Zalevskaya K. N. Justification of mining and processing technology for technogenic raw materials of the Novotroitsk tailings storage facility. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 1, pp. 277 — 289. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-277-289.

16. Smirnova A. D., Fedotov G. S., Mikhailova T. V. Geological modeling of the tutuyas site in Kuzbass using the micromine origin & beyond GIS. *Ugol'*. 2024, no. 6, pp. 119 — 124. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-119-124.

17. Eremenko A. A., Kopytov A. I., Filippov V. N., Volkov A. V. Assessment of the geodynamic state of rock mass during blasting of ore reserves at the Tashtagol and Sheregesh deposits. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2023, no. 3 (157), pp. 70 — 78. [In Russ]. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-3-70-78.

18. Isachenko A. A. Stages of project decision-making in the underground mining of structurally complex coal deposits. *High Technologies for Exploration and Mining of Mineral Resources*. 2023, no. 9, pp. 77 — 83. [In Russ].

19. *Ukazaniya po zashchite rudnikov ot zatopleniya i okhrane podrabatyvaemykh ob"ektov na Verkhnekamskom mestorozhdenii kaliyno-magnievykh soley* [Guidelines for mine flood protection and safeguarding undermined facilities at the Verkhnekamsk potash-magnesium salt deposit], Perm; Berezniki, 2014, 130 p.

20. Evseev A. V. Organization of regular instrumental monitoring of load-bearing elements of the mining system at the VCMKS mines. *Gornoe ekho*. 2020, no. 3 (80), pp. 36 — 39. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2020.4.7.

21. Lomakin I. S., Tsayukov A. A., Evseev A. V. Physical and mathematical modeling of deformation and failure of inter-chamber pillars. *Perm federal research center journal*. 2021, no. 1, pp. 47 — 53. [In Russ]. DOI: 10.7242/2658-705X/2021.1.4.

22. Kiselev V. A., Guseva N. V. Pipeline route zoning by accident hazard level using GIS and artificial neural networks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 10-2, pp. 185 — 192. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_185.

23. Basargin A. A., Satsyuk A. V., Chedzhemov S. R. Application of spatial geological modeling for mineral resource assessment of the Udokan copper deposit (Chita region). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 3, pp. 988 — 999. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-988-999.

24. Noskov V. A., Badtiev B. P., Pavlovich A. A. Risk management in open-pit mining. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 2, pp. 51 — 55. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.02.06.

25. Rybak Y., Khayrutdinov M. M., Kuziev D. A., Kongar-Syuryun C. B., Babyr N. V. Forecasting the geomechanical condition of the rock mass during mining of salt deposits with backfilling. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 61 — 70. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.2.

26. Pankov I. L., Anikin V. V., Beltyukov N. L., Evseev A. V., Kuzminykh V. S., Lomakin I. S., Morozov I. A., Toksarov V. N., Udartsev A. A. Study of deformation and failure of rock salt for developing geomechanical assessment methods for load-bearing elements of chamber mining systems at potash deposits. *Perm federal research center journal*. 2022, no. 3, pp. 14 — 24. [In Russ]. DOI: 10.7242/2658-705X/2022.3.2/.

27. Materova E. S., Aksenova Z. A., Sharafullina R. R., Galimova G. A., Shilov M. L. Digitalization of activities of Russian mining companies. *Ugol'*. 2024, no. 11, pp. 117 — 121. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-57902024-11-117-121.

28. Rylnikova M. V., Tsupkina M. V., Kirkov A. E. Big data collection and processing technologies as the basis for increasing the reliability of primary information about rock masses in the development of mineral and technogenic deposits. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 1-1, pp. 308 — 327. [In Russ]. DOI: 10.46689/2218-5194-2023-1-1-308-327.

29. Pisetskiy V. B., Lapin S. E. On solving the problem of remote forecasting of objects with risk of hazardous geodynamic phenomena during underground mining. *Occupational Safety in Industry*. 2025, no. 1, pp. 90 — 95. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-1-90-95.

30. Sidorov D. V., Ponomarenko T. V. Application of digital geomechanical twins for forecasting and risk assessment of ore reserve loss in mining project development. *Russian Mining Industry Journal*. 2022, no. 3, pp. 112 — 117. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-3-112-117.

31. Qin X. S., Cao H., Guo L. J. Sensitivity analysis of factors influencing pillar stability in the deep stope of underground salt mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020, vol. 570, no. 2, article 022002. DOI: 10.1088/1755-1315/570/2/022002.

32. Suorineni F. T., Mgumbwa J. J., Kaiser P. K., Thibodeau D. Mining of orebodies under shear loading. Part 2. Failure modes and mechanisms. *Mining Technology*. 2014, vol. 123, no. 4, pp. 240—249. DOI: 10.1179/1743286314Y.0000000072.

33. Egorov N. A., Fokin I. V., Dubinya N. V. Forecasting the stress–strain behavior of rock samples using a recurrent neural network. *Science and technologycal developments*. 2024, vol. 103, no. 2, pp. 59—74. [In Russ]. DOI: 10.21455/std2024.2-4.

34. Neverov S. A., Neverov A. A., Konurin A. I., Adylkanova M. A., Orlov D. V. Application of neural networks to determine stress changes in rock mass by photoelasticity method. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 6, pp. 176—189. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230616.

35. Fedorov A. I., Kuznetsov S. A., Ardislamova D. R., Davletova A. R., Khakimov A. A. Use of clustering methods based on mechanical properties for stress analysis at the Severo-Komsomolskoe deposit. *Neft-Gaz Exposition*. 2025, no. 2 (112), pp. 65—70. [In Russ]. DOI: 10.24412/2076-6785-2025-2-65-70.

36. Yuxin Wang, Alireza Rezaei, Stephen Hicks Digital twin applications in geotechnical engineering: a systematic review. *Machine Learning and Data Science in Geotechnics*. 2025, vol. 1, no. 1, pp. 77—91. DOI: 10.1108/MLAG-02-2025-0005.

37. Pouya Nobahar, Chaoshui Xu, Peter Dowd, Roohollah Shirani Faradonbeh Exploring digital twin systems in mining operations: A review. *Green and Smart Mining Engineering*. 2024, vol. 1, no. 4, pp. 474—492. DOI: 10.1016/j.gsme.2024.09.00.

38. Xiong Wang, Yue Pan, Jinjian Chen Digital twin with data-mechanism-fused model for smart excavation management. *Automation in Construction*. 2024, vol. 168, part A. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105749.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Грищенкова Екатерина Николаевна[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: ekgr.mail@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0001-5377-7639,
Морозов Константин Валентинович[1] — канд. техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3597-756X, Scopus Author ID: 57196008021,
Носков Владимир Александрович[1] — канд. экон. наук,
заместитель директора по науке и инновационной деятельности,
e-mail: noskov_va@pers.spmi.ru, ORCID ID: 0009-0006-6971-541X,
[1] Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.
Для контактов: Грищенкова Е.Н., e-mail: ekgr.mail@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.N. Grishchenkova[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: ekgr.mail@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5377-7639,
K.V. Morozov[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
e-mail: morozov_kv@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-3597-756X, Scopus Author ID: 57196008021,
V.A. Noskov[1], Cand. Sci. (Econ.), Deputy Director
for Science and Innovation, e-mail: noskov_va@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0009-0006-6971-541X,
[1] Research Center for Geomechanics and Mining Problems,
Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: E.N. Grishchenkova, e-mail: ekgr.mail@gmail.com.

Получена редакцией 30.07.2025; получена после рецензии 23.10.2025; принята к печати 17.11.2025.
Received by the editors 30.07.2025; received after the review 23.10.2025; accepted for printing 17.11.2025.