

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ В ПРЕДЕЛАХ ВЫЕМОЧНОГО СТОЛБА НА ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОДЗЕМНОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Л.Д. Павлова¹, В.Н. Фрянов¹, С.В. Ефременко¹

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ),
Новокузнецк, Россия, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Аннотация: Для прогнозирования рисков возникновения опасных производственных ситуаций при подземной отработке угольного пласта в выемочном столбе, таких как обрушения пород кровли, отжим угля и разрушение элементов механизированной крепи, предлагается учитывать совместное влияние пород кровли и угольного пласта в виде средневзвешенного показателя устойчивости. Выявлено, что величина этого показателя в пределах выемочного участка может существенно изменяться в зависимости от структуры и свойств горных пород. Обоснованы предельные значения показателя устойчивости угольного пласта и пород кровли. По результатам вычислительных экспериментов с использованием комплекса программ, разработанного на основе метода конечных элементов, установлены зависимости от показателя устойчивости следующих геомеханических параметров массива горных пород в окрестности длинного комплексно-механизированного забоя: конвергенции пород кровли и почвы отрабатываемого пласта, податливости секций механизированной крепи, отжима угля в краевой части пласта, объема вывала пород кровли в очистном забое, высоты зоны обрушения пород непосредственной кровли. Полученные параметры рекомендуются для разработки и реализации технологических решений по профилактике опасных производственных ситуаций при подземной отработке угольных пластов с изменчивой структурой и свойствами пород кровли.

Ключевые слова: геомеханические параметры, конвергенция пород, очистной забой, показатель устойчивости, смещения пород, угольный пласт, численное моделирование.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-20080, <https://rscf.ru/project/25-21-20080/> и гранта Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Павлова Л. Д., Фрянов В. Н., Ефременко С. В. Численное исследование влияния изменчивости природных факторов в пределах выемочного столба на геомеханические параметры подземного очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 51–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_51.

Numerical study of the influence of natural factors variability within the extraction column on the geomechanical parameters of an underground mining face

L.D. Pavlova¹, V.N. Fryanov¹, S.V. Efremenko¹

¹ Siberian State Industrial University (SibSIU), Novokuznetsk, Russia, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Abstract: This article proposes taking into account the combined effects of roof and coal seam rock in the form of a weighted average stability index to predict the risks of hazardous industrial situations during underground coal seam mining, such as roof rock collapses, coal squeezing, and mechanized support failure. It is found that the value of this index within a working section can vary significantly depending on the structure and properties of the rock. Limit values for the stability index of the coal seam and roof rock are substantiated. Based on the results of computational experiments using a software package developed using the finite element method, the following geomechanical rock mass parameters in the vicinity of a longwall mechanized longwall face were determined to be dependent on the stability index: convergence of the roof and floor rocks of the mined seam, compliance of mechanized support sections, coal squeeze at the seam edge, roof rock fall volume at the production face, and the height of the immediate roof rock collapse zone. The obtained parameters are recommended for the development and implementation of technological solutions for the prevention of hazardous production situations during underground mining of coal seams with variable roof rock structure and properties.

Key words: geomechanical parameters, rock convergence, working face, stability index, rock displacement, coal seam, numerical modeling.

Acknowledgements: The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 25-21-20080, <https://rscf.ru/project/25-21-20080/> and the grant of the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Pavlova L. D., Fryanov V. N., Efremenko S. V. Numerical study of the influence of natural factors variability within the extraction column on the geomechanical parameters of an underground mining face. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10-1):51-62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_51.

Введение

Для обоснования параметров системы управления геомеханическими процессами в окрестности длинного очистного забоя угольной шахты применяются традиционные методы классификации пород кровли на непосредственную и основную. При этом используются известные эмпирические зависимости шагов обрушения пород кровли от отношения толщины породных слоев и мощности отрабатываемого угольного пласта [1]. Применение этих зависимостей на практике иногда приводит к непрогнозируемым рискам обрушения пород кровли,

отжиму угля, зажатию «насухо» секций механизированной крепи и длительным аварийным остановкам очистного забоя.

По результатам анализа планов горных работ и фактических показателей угольных шахт установлено, что в пределах панели, выемочного столба или отдельного блока основные природные и техногенные факторы характеризуются пространственно-временной изменчивостью. Среди изменяющихся природных факторов следует выделить [2]:

- мощность, строение и прочность угля в пласте и вмещающих его породах;

- глубину разработки, углы падения и простираения пласта;
- пространственное положение и параметры геологических нарушений, зон геодинамических явлений.

К основным техногенным факторам, согласно [3], относятся:

- последовательность отработки угольных пластов в свите;
- технологическая схема, размеры и направления отработки выемочных угольных столбов в панели;
- тип и конструкция механизированных крепей в очистном забое;
- способы и средства выемки угля и управления кровлей;
- способы и средства проведения работ по профилактике разрушений элементов крепи горных выработок, горных ударов и внезапных выбросов угля, породы и газа.

С учетом горно-геологических условий, требований и рекомендаций в проектной документации для отработки выемочного столба принимаются основные решения, например тип механизированного комплекса, способ управления кровлей, пространственное расположение подготовительных выработок. Эти решения остаются постоянными на весь период отработки запасов угля в выемочном столбе.

Однако вследствие изменчивости в пределах выемочного столба указанных природных и техногенных факторов принятые в проектной документации показатели не всегда достигаются на практике. Происходят внеплановые остановки горных работ при возникновении опасных производственных ситуаций в виде вывалов и обрушений пород, отжима угля с поверхности забоя, разрушения элементов крепи, горных ударов и внезапных выбросов угля и газа [1, 4, 5]. Кроме того, периодически угольные шахты вынуждены приостанавливать горные работы по решениям Рос-

технадзора из-за нарушения требований промышленной безопасности.

В настоящее время для прогнозирования устойчивости очистных и подготовительных выработок предлагаются различные подходы как российских [6–8], так и иностранных ученых [5, 9, 10], основанные на результатах натурных измерений, аналитических и статистических методах оценки состояния пород в окрестности выработок. Однако такие подходы не позволяют учитывать прочностные и деформационные свойства неоднородного массива горных пород.

Результаты исследований влияния трещиноватости, хрупкости и прочности горных пород на напряженно-деформированное состояние геомассива, изложенные в работах [11–13], подтверждают необходимость учета природных факторов при моделировании геомеханических процессов в зоне влияния горных выработок.

В этой связи возникает актуальная научно-практическая задача прогноза рисков возникновения аварий и инцидентов при отработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях. Целью исследования является выявление по результатам вычислительных экспериментов закономерностей совместного влияния природных и техногенных факторов на напряженно-деформированное состояние массива горных пород в окрестности длинного комплексно-механизированного очистного забоя для реализации способов и средств управления горным давлением.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются геомеханические процессы в окрестности длинного очистного забоя, параметры которых зависят от пространственной изменчивости природных факторов массива горных пород. План выемочного

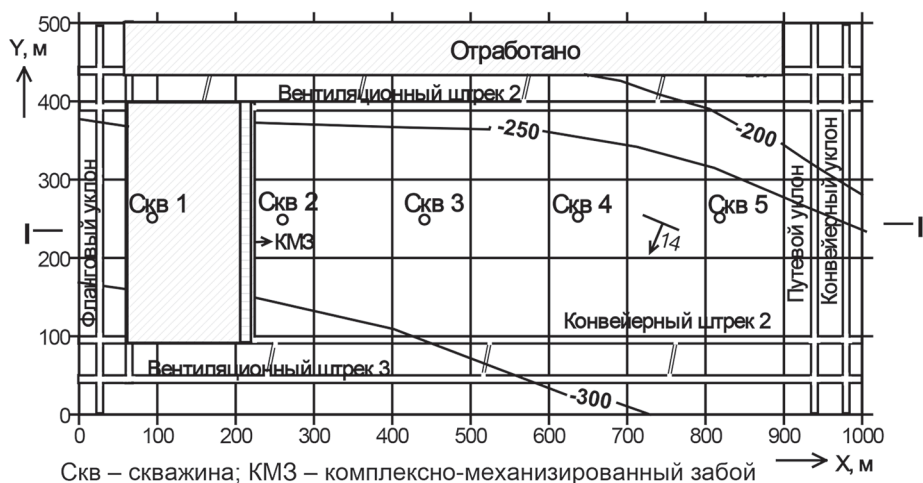


Рис. 1. Схема подготовки и отработки длинным комплексно-механизированным забоем угольного пласта в пределах выемочного столба шахты

Fig. 1. Scheme of preparation and development of a long, complex-mechanized coal seam face within the mine's extraction column

участка одной из шахт Кузбасса приведен на рис. 1. В пределах панели верхний выемочный столб отработан. Запасы нижнего выемочного столба подготовлены и отрабатываются комплексно-механизированным забоем (КМЗ). Длина лавы 300 м, длина отрабатываемой части выемочного столба 830 м. В пределах выемочного участка пробурено 5 скважин для проведения геологоразведочных работ (см. рис. 1).

Для решения задач горной геомеханики широко применяется численное моделирование, как в России [14–17], так и за рубежом [4, 18, 19], в том числе с применением метода конечных элементов, фрактальных моделей, нейронных сетей.

В данной работе программа исследований включает формирование вариантов изменчивости природных и техногенных факторов, математическое моделирование геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при подземной отработке угольного пласта, описываемых системой дифференциальных уравнений механики сплошной среды, и численную реали-

зацию методом конечных элементов с использованием комплекса программ, разработанного авторами [20, 21].

Двухмерная модель массива горных пород в пределах выемочного столба принята в виде вертикального сечения I–I, указанного на рис. 1 по осям скважин 1–5, пласт в пределах вертикального сечения горизонтальный. Длина модели принимается равной 1000 м, высота — 700 м, глубина залегания угольного пласта — 600 м, мощность — 3 м. Структурно модель состоит из 100 породных слоев, в том числе угольного пласта, отрабатываемого длинным комплексно-механизированным забоем с распором секций крепи 200 кН/м². Длина очистной выработки в вертикальном сечении I–I принята равной 100 м.

С учетом последовательного изменения упругих и прочностных характеристик горного массива в окрестности очистного забоя проведено численное моделирование деформирования горных пород при упругом, упругопластическом и запредельном состояниях. По результатам вычислительных экспериментов выполнено обоснование риска возник-

новения опасных производственных ситуаций, выбор способов и средств профилактики этих ситуаций.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе выполнен анализ результатов обработки верхнего выемочного столба и выявлены отклонения фактических показателей работы очистного забоя от проектных. Эти отклонения возникли вследствие проявления следующих форм горного давления:

- отжим угля в очистном забое до 1 м и необходимость остановки очистного забоя для упрочнения угля в пласте;
- вывалы пород кровли высотой до двух метров между линией очистного забоя и секциями крепи;

- разрушение элементов секций механизированной крепи.

Указанные негативные проявления геомеханических процессов происходили неравномерно в пределах выемочного столба с периодическими остановками и снижением темпов подвигания очистного забоя.

Для прогнозирования геомеханических параметров и профилактики отклонений фактических показателей очистного забоя от плановых проведен анализ горно-геологических условий залегания угольного пласта и пород кровли в нижнем выемочном столбе. На рис. 2 показаны литологические колонки угольного пласта и вмещающих его пород по пяти скважинами, положение которых указано на рис. 1.

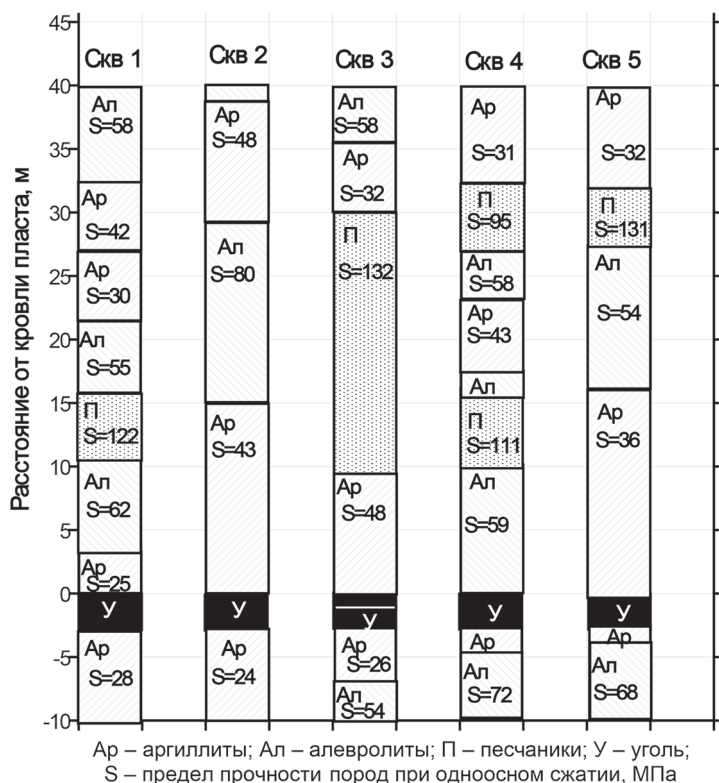


Рис. 2. Стратиграфические колонки массива горных пород в окрестности очистного забоя по скважинам 1–5

Fig. 2. Stratigraphic columns of the rock massif in the vicinity of the working face for wells 1–5

Как следует из рис. 2, структура литологических колонок по типу и прочности пород, мощности породных слоев и положению их относительно отрабатываемого угольного пласта существенно различается. Поэтому, согласно рекомендациям [2, 3], необходима количественная оценка влияния структуры, прочности и пространственного положения породных слоев и угольного пласта в углепородной толще на основные геомеханические параметры в окрестности очистного забоя, такие как: смещения пород кровли и почвы пласта на разных расстояниях от очистного забоя, коэффициент концентрации вертикальных напряжений, высота зоны разрушения пород кровли между очистным забоем и секциями механизированной крепи, ширина зоны отжима угля в очистном забое.

Для расчета средневзвешенного показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта (R_{yk} , МПа) предлагается использовать зависимость

$$R_{yk} = \frac{R_1 \frac{m_1}{h_1} + R_2 \frac{m_2}{h_2} + R_3 \frac{m_3}{h_3} + \dots + R_n \frac{m_n}{h_n}}{\frac{m_1}{h_1} + \frac{m_2}{h_2} + \frac{m_3}{h_3} + \dots + \frac{m_n}{h_n}} \quad (1)$$

где $R_1, R_2, \dots, R_n$ — пределы прочности угля и породных прослоев в пласте,

пород в слоях кровли при сжатии, МПа; $m_1, m_2, \dots, m_n$ — мощности (толщина) угольного пласта и породных прослоев в пласте, слоев кровли, м; $h_1, h_2, \dots, h_n$ — расстояние от почвы пласта до середины угольных и породных слоев в пласте и кровле, м; n — количество слоев в угольном пласте и породах непосредственной кровли.

Аналогичная зависимость предлагается для расчета средневзвешенного показателя устойчивости пород почвы (R_n , МПа):

$$R_n = \frac{r_1 \frac{l_1}{q_1} + r_2 \frac{l_2}{q_2} + r_3 \frac{l_3}{q_3} + \dots + r_k \frac{l_k}{q_k}}{\frac{l_1}{q_1} + \frac{l_2}{q_2} + \frac{l_3}{q_3} + \dots + \frac{l_k}{q_k}}, \quad (2)$$

где $r_1, r_2, \dots, r_k$ — пределы прочности пород в слоях почвы при сжатии, МПа; $l_1, l_2, \dots, l_k$ — мощности (толщина) породных слоев почвы, м; $q_1, q_2, \dots, q_k$ — расстояние от почвы пласта до середины породных слоев почвы, м; k — количество породных слоев в непосредственной почве отрабатываемого угольного пласта.

Коэффициент разрыхления пород непосредственной кровли вычисляется как отношение суммы мощностей пород непосредственной кровли и угольного пласта к мощности пород непосредственной кровли [1].

Таблица 1

Показатели устойчивости пород кровли и почвы
Roof and soil stability indicators

Наименование показателя	Варианты положения очистного забоя у скважин				
	1	2	3	4	5
Показатель устойчивости пород кровли и угольного пласта, МПа	35,4	48,5	61,4	53,6	23,5
Показатель устойчивости пород почвы, МПа	28,0	24,0	30,2	51,1	44,3
Мощность пород непосредственной кровли, м	11,0	15,0	9,0	10,0	17,0
Коэффициент разрыхления пород непосредственной кровли	1,27	1,20	1,33	1,30	1,18

Вычисленные показатели представлены в табл. 1.

На втором этапе исследований решались следующие задачи:

- формирование вариантов локальных геометрической и математической моделей массива горных пород и очистного забоя в пределах зоны влияния каждой геологической скважины, показанной на рис.1;

- численное моделирование геомеханических процессов в структурно неоднородном массиве горных пород с учетом влияния подземных выработок и величины распора секций механизированной крепи;

- разработка на основе полученных результатов распределения геомеханических параметров технологических решений для профилактики опасных производственных ситуаций.

По результатам численного моделирования получены параметры напряжен-

но-деформированного состояния угленосного массива: вертикальные смещения пород кровли и почвы пласта, напряжения в краевой части угольного пласта и породах кровли, параметры зон разрушения угля и пород в окрестности очистного забоя.

В табл. 2 представлены результаты вычислительных экспериментов в окрестности очистного забоя вблизи зон расположения геологических скважин.

Геомеханические параметры, представленные в табл. 2, характеризуются изменчивостью при расположении очистного забоя в зоне влияния соответствующей скважины. Наиболее значимыми для безопасного ведения горных работ являются высота вывала пород незакрепленной кровли между линией забоя и секциями крепи, а также конвергенция пород кровли и почвы краевой части пласта в очистном забое, которые влияют на устойчивость угля и

Таблица 2

Геомеханические параметры массива горных пород в окрестности очистного забоя и скважин в выемочном столбе

Geomechanical parameters of the rock mass in the vicinity of the working face and wells in the extraction column

Наименование геологических и геомеханических параметров	Варианты положения очистного забоя у скважин				
	1	2	3	4	5
Расстояние от краевой части пласта до точки с максимальным коэффициентом концентрации вертикальных напряжений в зоне опорного горного давления, м	1,0	0,7	1,1	1,1	1,1
Коэффициент концентрации вертикальных напряжений на границе пласта в зоне запредельного состояния угля	1,4	1,7	1,0	1,3	1,0
Ширина зоны отжима угля в краевой части пласта, м	1,2	1,3	0,9	1,2	1,1
Высота вывала пород незакрепленной кровли между линией забоя и секциями крепи, м	1,7	1,2	0,4	0,5	2,6
Высота зоны обрушенных пород непосредственной кровли за крепью, м	10,0	8,9	6,2	8,0	12,1
Конвергенция пород кровли и почвы краевой части пласта в очистном забое, мм	141	124	97	105	191
Конвергенция пород кровли и почвы пласта в зоне установки и распора секций крепи в очистном забое, мм	100	112	88	100	113
Оседание непосредственной кровли за секциями крепи, мм	228	173	165	212	251

пород, и риски возникновения аварий и инцидентов.

По результатам сравнения расчетных значений в табл. 1 и 2 и рекомендаций [3] определены предельные значения показателя устойчивости угольного пласта и пород кровли:

$$R_{yk} = \begin{cases} <40, \text{ риск возникновения вывалов и обрушения пород кровли;} \\ 40 \div 50, \text{ плановый режим безаварийной работы очистного забоя;} \\ >50, \text{ риск возникновения внезапных геодинамических явлений.} \end{cases}$$

На рис. 3 приведены графики зависимости параметров зон разрушения угля и пород в окрестности очистного забоя от показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта. Согласно графикам, высота зоны разрушенных пород кровли за секциями механизированной крепи уменьшается в 2 раза при увеличении показателя устойчивости в 2,6 раза. В пределах выемочного столба

ширина зоны отжима угля в очистном забое изменяется в 1,4 раза. Наиболее опасной по устойчивости является краевая часть угольного пласта, где отжим угля достигает 1,3 м, а высота вывалов пород кровли — 2,6 м (см. табл. 2). В этих зонах требуется проведение специальных мероприятий по упрочнению угля в пласте и предупреждению обрушений пород кровли в очистном забое.

Изменения свойств угля и пород в зоне влияния очистного забоя произошли вследствие перераспределения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, что подтверждается графиками на рис. 4. По характеру изменения параметров зон разрушенных пород установлено, что с увеличением показателя устойчивости пород кровли и пласта в 2 раза величины смещений пород снижаются в 1,5–2 раза.

Влияние распора секции механизированной крепи приводит к неравномерному изменению конвергенции верхнего перекрытия и основания секции крепи

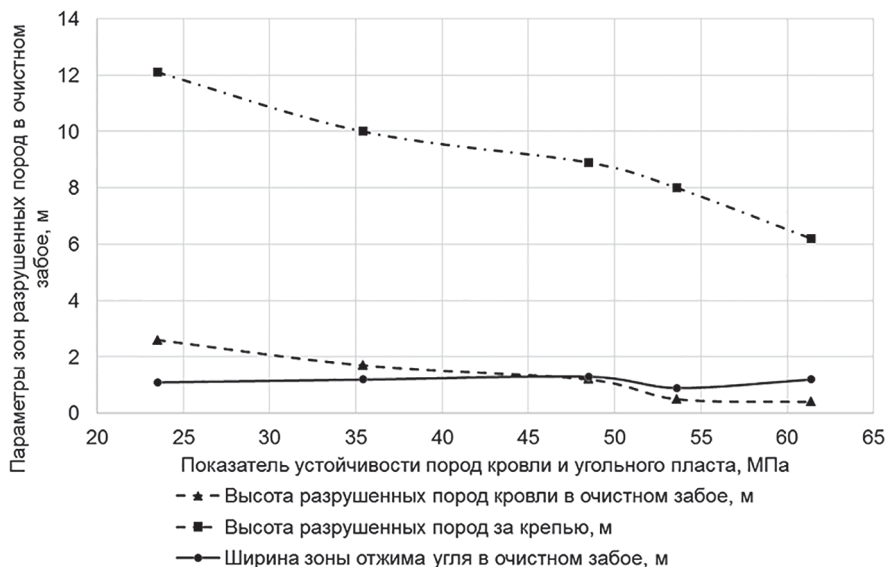


Рис. 3. Графики зависимости параметров зон разрушения угля и пород в окрестности очистного забоя от показателя устойчивости пород кровли и пласта

Fig. 3. Graphs of the dependence of the parameters of coal and rock destruction zones in the vicinity of the working face on the stability index of the roof and seam rocks

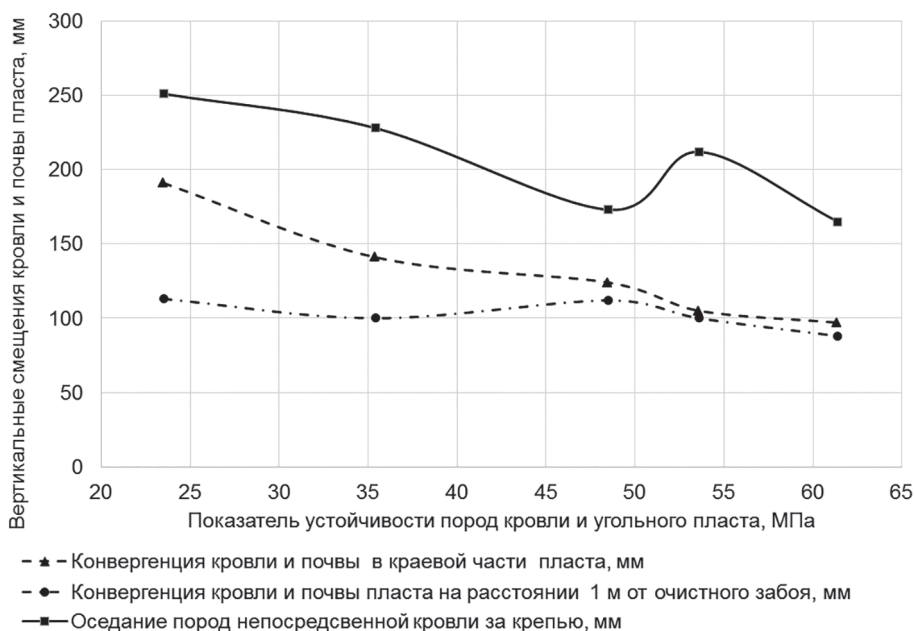


Рис. 4. Графики зависимости вертикальных смещений от показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта

Fig. 4. Graphs of the dependence of vertical displacements on the stability index of roof rocks and coal seam

по сравнению с конвергенцией кровли и почвы краевой части пласта в очистном забое. Наиболее интенсивно влияет крепь на смещения кровли и почвы при показателе устойчивости пород кровли и пласта меньше 40.

При определенных сочетаниях природных и техногенных факторов на отдельных участках обрабатываемого выемочного столба, например при совокупности прочного угля в обрабатываемом пласте и наличии песчаников в породных слоях кровли, показатель устойчивости угольного пласта и пород кровли может принимать значение больше 50. Этот случай соответствует условиям напряженно-деформированного состояния пород в окрестности скважин 3 и 4. В подобной ситуации повышается риск возникновения в угольном пласте опасного геодинамического явления. В этом случае необходимо принять и реализовать технологические решения в виде механического разрушения, гидрораз-

рыва или передового торпедирования зависающих пород кровли.

Таким образом, предложенный в настоящей работе подход, основанный на результатах расчета средневзвешенного показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта, позволяет классифицировать породы кровли по управляемости с учетом прочности, мощности и пространственного положения породных слоев, что обеспечивает повышение точности прогноза геомеханических параметров.

Закключение

По результатам численного моделирования выявлены зависимости основных геомеханических параметров в структурно неоднородном геомассиве от величины средневзвешенного показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта в окрестности очистного забоя. Предложены технологические решения для профилактики опасных производственных ситуаций.

Установлены предельные значения показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта: при значении меньше 40 повышается риск возникновения вывалов и обрушения пород кровли, значение в интервале от 40 до 50 соответствует безаварийной работе очистного забоя, а в случае значения больше 50 возрастает вероятность геодинамических явлений в виде горных ударов, внезапных разрушений угольного пласта в очи-

стном забое при зависании и периодическом обрушении пород основной кровли.

Рекомендуется применение средне-взвешенного показателя устойчивости пород кровли и угольного пласта при проектировании параметров технологических схем отработки угольных пластов в сложных горно-геологических условиях и пространственной изменчивости свойств массива горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коровкин Ю. А., Савченко П. В. Теория и практика длинновластных систем. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2012. — 808 с.
2. Захаров В. Н., Забурдяев В. С., Артемьев В. Б. Угленородные массивы: прогноз устойчивости, риски, безопасность. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2013. — 280 с.
3. Клишин В. И., Рогова Т. Б., Шаклеин С. В., Писаренко М. В. Стратегия долгосрочного технологического развития угольной отрасли Кузбасса // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2024. — № 10. — С. 19–26.
4. Rong H., Li N., Cao C., Wang Y., Li J., Li M. Numerical simulation of blasting behavior of rock mass with cavity under high in-situ stress // Scientific Report. 2024, vol. 11, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-67088-5.
5. Yan H., Li H., Xie H., Xiao M., Pei J., Liu H., He J. A review on rockburst prediction and prevention to shape an ontology-based framework for better decision-making for underground excavations // Deep Underground Science and Engineering. 2025, vol. 5, no. 2, pp. 331–349. DOI: 10.1002/dug.2.70034.
6. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Исследования упругого, упруго-пластического и предельного состояний массива пород вблизи выработок по данным измерений на их границах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 4. — С. 27–35.
7. Анциферов С. В., Кудрявцев М. А. Метод геомеханического обоснования устойчивости грунта склонов, вмещающих горизонтальные выработки, расположенные параллельно земной поверхности // Горный журнал. — 2026. — № 3. — С. 26–32. DOI: 10.17580/gzh.2026.03.04.
8. Еременко В. А., Лушников В. Н., Косырева М. А. Метод рейтинговой оценки устойчивости подземных горных выработок Rm // Горный журнал. — 2025. — № 1. — С. 9–19. DOI: 10.17580/gzh.2025.01.02.
9. Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect // Engineering Failure Analysis. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.
10. Zhou J., Zhang Y., Li C., He H., Li X. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation // Underground Space. 2023, vol. 14, pp. 70–98. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.009.
11. Guo S., Qi S., Zheng B., Xue L., Wang X., Liang N., Zou Y., Tang F., Faisal W. M., Wen W., Li Y., Yu X. The confinement-affected strength variety of anisotropic rock mass // Materials. 2022, vol. 15, article 8444. DOI: 10.3390/ma15238444.
12. Kuang Z., Qiu S., Li S., Du S., Huang Y., Chen X. A new Rock Brittleness Index based on the characteristics of complete stress–strain behaviors // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2021, vol. 54, no. 3, pp. 1109–1128. DOI: 10.1007/s00603-020-02311-z.
13. Ju M., Wang D., Shi J., Li J., Yao Q., Li X. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2021, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1007/s40948-020-00209-2.
14. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Потапов В. П., Юшкин В. Ф. Новые методы и информационные технологии в экспериментальной геомеханике. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. — 292 с.

15. Вербило П. Э., Карасев М. А., Шишкина В. С. Прогноз геомеханического состояния структурно нарушенных породных целиков с учетом запредельного их деформирования Rm // Горный журнал. — 2025. — № 3. — С. 41–47. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.
16. Журкина Д. С., Лавриков С. В. К расчету концентрации напряжений в зоне влияния очистного забоя в рамках упругопластической модели градиентного типа // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2024. — № 3. — С. 24–36. DOI: 10.15372/FTPRPI20240303.
17. Журавков М. А., Николайчик М. А., Климович Н. М. Модифицированный алгоритм МКЭ с введением блочных упругих элементов моделирования геомеханического состояния подработанного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 3. — С. 3–12. DOI: 10.15372/FTPRPI20230301.
18. Diulin D. A., Prushak V. Ya., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322–330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.
19. Meethal R. E., Kodakkal A., Khalil M., Ghantasala A., Obst B., Bletzinger K-U., Wüchner R. Finite element method-enhanced neural network for forward and inverse problems // Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences. 2023, vol. 10. DOI: 10.1186/s40323-023-00243-1.
20. Eremin M., Peryshkin A., Esterhuizen G., Pavlova L., Fryanov V. Numerical analysis of pillar stability in longwall mining of two adjacent panels of an inclined coal seam // Applied Sciences. 2022, vol. 12, no. 21. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11028/pdf>. DOI: 10.3390/app122111028.
21. Дворянчиков М. В., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025697386. Геоконструктор для численного моделирования геомеханических процессов в зоне влияния природных и техногенных полей напряжений; ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т. — Фед. служба по интеллект. собств.; Дата регистр. 24.12.2025 Бюл. № 1. **ПАТ**

REFERENCES

1. Korovkin Yu. A., Savchenko P. V. *Teoriya i praktika dlinnolavnykh sistem* [Theory and practice of longwall systems], Moscow, 2012, 808 p.
2. Zakharov V. N., Ziburdaev V. S., Artem'ev V. B. *Ugleporodnye massivy: prognoz ustoychivosti, riski, bezopasnost'* [Carboniferous massifs: Stability forecast, risks, and safety], Moscow, 2013, 280 p.
3. Klishin V.I., Rogova T.B., Shaklein S.V., Pisarenko M.V. Long-term technological development strategy for the kuzbass coal industry. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2024, no. 10, pp. 19–26. [In Russ].
4. Rong H., Li N., Cao C., Wang Y., Li J., Li M. Numerical simulation of blasting behavior of rock mass with cavity under high in-situ stress. *Scientific Report*. 2024, vol. 11, no. 1. DOI: 10.1038/s41598-024-67088-5.
5. Yan H., Li H., Xie H., Xiao M., Pei J., Liu H., He J. A review on rockburst prediction and prevention to shape an ontology-based framework for better decision-making for underground excavations. *Deep Underground Science and Engineering*. 2025, vol. 5, no. 2, pp. 331–349. DOI: 10.1002/dug2.70034.
6. Chanyshv A. I., Abdulin I. M. Studies of elastic, elastic-plastic, and ultimate states of a rock mass near workings based on measurement data at their boundaries. *Journal of Mining Sciences*. 2019, no. 4, pp. 27–35. [In Russ].
7. Antsiferov S. V., Kudryavtsev M. A. Method of geomechanical justification of soil stability of slopes containing horizontal workings located parallel to the earth's surface. *Gornyi Zhurnal*. 2026, no. 3, pp. 26–32. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2026.03.04.
8. Eremenko V. A., Lushnikov V. N., Kosyreva M. A. Method of rating assessment of stability of underground mine workings Rm. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 1, pp. 9–19. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.01.02.
9. Zhang C., Zhao Y., Han P., Bai Q. Coal pillar failure analysis and instability evaluation methods: A short review and prospect. *Engineering Failure Analysis*. 2022, vol. 138, article 106344. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106344.
10. Zhou J., Zhang Y., Li C., He H., Li X. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation. *Underground Space*. 2023, vol. 14, pp. 70–98. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.05.009.

11. Guo S., Qi S., Zheng B., Xue L., Wang X., Liang N., Zou Y., Tang F., Faisal W. M., Wen W., Li Y., Yu X. The confinement-affected strength variety of anisotropic rock mass. *Materials*. 2022, vol. 15, article 8444. DOI: 10.3390/ma15238444.
12. Kuang Z., Qiu S., Li S., Du S., Huang Y., Chen X. A new Rock Brittleness Index based on the characteristics of complete stress–strain behaviors. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021, vol. 54, no. 3, pp. 1109–1128. DOI: 10.1007/s00603-020-02311-z.
13. Ju M., Wang D., Shi J., Li J., Yao Q., Li X. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining. *Geomechanics and Geo-physics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021, vol. 7, no. 1. DOI: 10.1007/s40948-020-00209-2.
14. Oparin V. N., Kiryaeva T. A., Potapov V. P., Yushkin V. F. *Novye metody i informatsionnye tekhnologii v eksperimental'noy geomekhanike* [New methods and information technologies in experimental geomechanics], Novosibirsk, 2021, 292 p.
15. Verbilo P. E., Karasev M. A., Shishkina V. S. Forecast of the geomechanical state of structurally disturbed rock pillars taking into account their extreme deformation Rm. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 3, pp. 41–47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.03.06.
16. Zhurkina D. S., Lavrikov S. V. On the calculation of stress concentration in the influence zone of the production face within the framework of an elastic-plastic gradient model. *Journal of Mining Sciences*. 2024, no. 3, pp. 24–36. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20240303.
17. Zhuravkov M. A., Nikolaychik M. A., Klimovich N. M. Modified FEM algorithm with the introduction of block elastic elements for modeling the geomechanical state of an underworked rock mass. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 3, pp. 3–12. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230301.
18. Diulin D. A., Prushak V. Ya., Gegedesh M. G. Analysis of the stress-strain state of problematic sections of the shaft of the mine using computer simulation. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2023, vol. 67, no. 4, pp. 322–330. DOI: 10.29235/1561-8323-2023-67-4-322-330.
19. Meethal R. E., Kodakkal A., Khalil M., Ghantasala A., Obst B., Bletzing K-U., Wüchner R. Finite element method-enhanced neural network for forward and inverse problems. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*. 2023, vol. 10. DOI: 10.1186/s40323-023-00243-1.
20. Eremin M., Peryshkin A., Esterhuizen G., Pavlova L., Fryanov V. Numerical analysis of pillar stability in longwall mining of two adjacent panels of an inclined coal seam. *Applied Sciences*. 2022, vol. 12, no. 21. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11028/pdf>. DOI: 10.3390/app122111028.
21. Dvoryanchikov M. V., Pavlova L. D., Fryanov V. N. *Certificate of state registration of the computer program No. 2025697386*. 24.12.2025. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фряннов Виктор Николаевич¹ — д-р техн. наук, профессор, профессор,
e-mail: zzz338@rdtc.ru, ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,
Павлова Лариса Дмитриевна¹ — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой,
e-mail: ld_pavlova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,
Ефременко Софья Вячеславовна¹ — ассистент кафедры,
e-mail: sofyaefremenko2002@mail.ru,

¹ Сибирский государственный индустриальный университет (СибГИУ).

Для контактов: Павлова Л.Д., e-mail: ld_pavlova@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.N. Fryanov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor,
e-mail: zzz338@rdtc.ru, ORCID ID: 0000-0001-6803-458X,
L.D. Pavlova¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,
e-mail: ld_pavlova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2480-8165,
S.V. Efremenko¹, Assistant of Chair, e-mail: sofyaefremenko2002@mail.ru,
¹ Siberian State Industrial University (SibSIU), 654007, Novokuznetsk, Russia.
Corresponding author: L.D. Pavlova, e-mail: ld_pavlova@mail.ru.

Получена редакцией 17.04.2026; получена после рецензии 09.07.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 17.04.2026; received after the review 09.07.2026; accepted for printing 20.09.2026.