

УДК 551.2:622.271.272 © Л.Д. Павлова¹, В.Н. Фрянов¹,
С.М. Никитенко², 2024

UDC 551.2:622.271.272 © L.D. Pavlova¹, V.N. Fryanov¹,
S.M. Nikitenko², 2024

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
654007, г. Новокузнецк, Россия

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk,
654007, Russian Federation

² ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии
Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ УУХ СО РАН),
650065, г. Кемерово, Россия

² Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Kemerovo, 650065, Russian Federation

✉ e-mail: ld_pavlova@mail.ru

✉ e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Прогнозирование устойчивости горных выработок при отработке трудноизвлекаемых запасов в зоне взаимного влияния открытых и подземных разработок*

Forecasting the stability of mine workings during the development of hard-to-recover reserves in the zone of mutual influence of open and underground developments

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-146-151>

ПАВЛОВА Л.Д.

Доктор техн. наук, профессор,
заведующая кафедрой прикладной
математики и информатики,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»,
654007, г. Новокузнецк, Россия,
e-mail: ld_pavlova@mail.ru

ФРЯНОВ В.Н.

Доктор техн. наук,
профессор кафедры геотехнологии,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»,
654007, г. Новокузнецк, Россия

Выявлены закономерности изменения устойчивости подземных выработок и угольных целиков с учетом влияния технологических взрывов при открытой разработке угольных пластов. Предложена синусоидальная форма зависимости колебания точек массива горных пород при воздействии природных и техногенных сейсмических волн. Параметры зависимости предлагается устанавливать по результатам мониторинга микросейсмических событий с использованием датчиков системы GITS.

Для предотвращения опасных производственных ситуаций в виде обрушения подработанных пород кровли, разрушения угольных целиков и угольного пласта в выемочной панели по результатам моделирования предлагается проводить прогнозирование геомеханических и геодинамических процессов и оптимизацию графиков проведения взрывных работ на разрезах и движения забоев очистных и подготовительных выработок на угольных шахтах.

Ключевые слова: открытые горные работы, подземные выработки, разрушение пород, сейсмические события, технологические взрывы, трудноизвлекаемые запасы.



НОЦ
КУЗБАСС –
ДОНБАСС

Научно-образовательный
центр «Кузбасс-Донбасс»

* Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации 11.05.2022 № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1190 от 27.09.2022).

Для цитирования: Павлова Л.Д., Фрянов В.Н., Никитенко С.М. Прогнозирование устойчивости горных выработок при отработке трудноизвлекаемых запасов в зоне взаимного влияния открытых и подземных разработок // Уголь. 2024;(115):146-151. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-146-151.

Abstract

The patterns of changes in the stability of underground workings and coal mines have been revealed, taking into account the influence of technological explosions during open-pit mining of coal seams. A sinusoidal form of dependence of the oscillation of the points of the rock mass under the influence of natural and man-made seismic waves is proposed. The dependence parameters are proposed to be set based on the results of monitoring microseismic events using GITS sensors.

In order to prevent dangerous industrial situations in the form of collapse of damaged roof rocks, destruction of coal pillars and coal seam in the excavation panel, based on the results of modeling, it is proposed to predict geomechanical and geodynamic processes and optimize schedules for blasting operations at sections and movement of faces of treatment and preparatory workings at coal mines.

Keywords

Open-pit mining, underground workings, rock destruction, seismic events, technological explosions, hard-to-recover reserves.

Acknowledgements

The article was prepared with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the integrated scientific and technical program of the full innovation cycle, approved by the Order of the Government of the Russian Federation as of 11.05.2022 № 1144-r (Agreement № 075-15-2022-1190 as of 27.09.2022).

For citation

Pavlova L.D., Fryanov V.N., Nikitenko S.M. Forecasting the stability of mine workings during the development of hard-to-recover reserves in the zone of mutual influence of open and underground developments. *Ugol'*. 2024;(115):146-151. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-146-151.

НИКИТЕНКО С.М.

Доктор экон. наук, доцент,
главный научный сотрудник
лаборатории угольного машиноведения,
ФГБНУ «Федеральный исследовательский
центр угля и углехимии
Сибирского отделения
Российской академии наук»,
650065, г. Кемерово, Россия,
e-mail: nsm.nis@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

В Кузбассе в 2023 г. открытым способом добыто угля – 143,1 млн т, а подземным способом – 71 млн т. Особо следует отметить, что открытые и подземные выработки расположены, как правило, в зонах взаимного влияния. Устойчивость подземных выработок и угольных целиков при одновременной отработке открытым и подземным способами трудноизвлекаемых запасов угля определяется следующими факторами:

– пространственным расположением соседних шахтных и карьерных полей в районе интенсивных природных и техногенных мелкоамплитудных землетрясений;

– активизацией процессов сдвижения массива горных пород и повышением сложности извлечения угольных пластов при совмещении во времени и пространстве опасных техногенных процессов в виде технологических взрывов, обрушений на больших площадях подработанных подземным способом пород кровли, перемещении вскрышных пород.

Перечисленные факторы следует рассматривать как предвестники повышения риска возникновения аварий или инцидентов. При сочетании нескольких предвестников, таких как сближение фронтов очистных работ на угольном разрезе и угольной шахте, наложение энергии природных и техногенных сейсмических событий, неплановые остановки очистных и подготовительных забоев, риск возникновения неблагоприятной ситуации возрастает.

Актуальность проведения исследований взаимного влияния открытых и подземных горных работ в сейсмически активных районах на геомеханическое состояние массива горных пород подтверждается в работах как российских [1, 2, 3, 4], так и иностранных авторов [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Выявлена активизация взаимодействия сейсмических и геодинамических явлений в связи с увеличением глубины ведения горных работ, повышением газоносности угольных пластов и, как следствие, повышение технологического риска возникновения аварий и инцидентов.

В работе [1] установлено, что частота возникновения сейсмических волн природного и техногенного происхождения в Кузнецкой котловине, в окрестности действующих угольных шахт и разрезов составляет 1-13 мелкоамплитудных землетрясений в час. Техногенные взрывы с 10 до 16 ч в течение суток по магнитуде, как правило, больше магнитуды природных землетрясений, то есть необходимо корректно проводить анализ всех типов событий, так как в период взрывных работ могут происходить мелкоамплитудные природные землетрясения.

Для техногенных взрывов характерна мощная низкочастотная поверхностная волна, однако, так как глубина природных землетрясений небольшая (0-5 км), то и в этом случае возникает поверхностная волна. Поэтому для оценки происхождения и параметров волны необходимо использовать сведения от предприятий о времени производства взрывов, обрушении подработанных пород кровли, разрушении угольных целиков, горных ударах. В пределах горного отвода шахты предлагается идентифицировать вид события с помощью датчиков системы сейсмического мониторинга GITS [2].

В этих условиях прогнозирование напряженно-деформированного состояния геомассива и устойчивости горных выработок при отработке трудноизвлекаемых запасов в зоне влияния открытых и подземных разработок позволит существенно повысить уровень промышленной безопасности угольных шахт.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются закономерности взаимодействия геодинамических и технологических процессов при ведении горных работ на горнодобывающих предприятиях. В качестве базовых приняты Ерунаковское и Увальное каменноугольные месторождения Кузбасса.

В пределах обрабатываемых участков выявлены дизъюнктивные нарушения с амплитудами перемещения крыльев 5-8, 20-75 м. По результатам проведенного ВНИМИ [11] анализа геолого-тектонического строения в пределах горных отводов действующих предприятий выделены неотектонические разломы, влияние которых на безопасность подземных горных работ может быть существен-

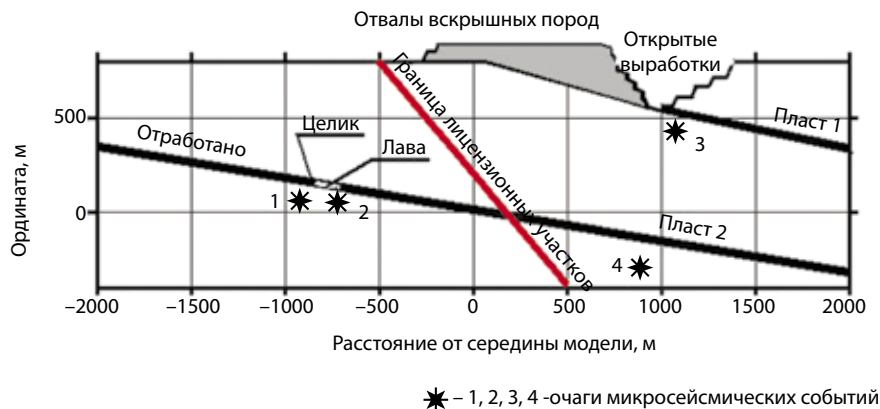


Рис. 1. Геометрическая модель массива горных пород и выработок в пределах лицензионных участков угольной шахты и разреза

Fig. 1. A geometric model of the rock mass and mine workings within the underground coal mine and the strip coal mine license areas

ным при интеграции сейсмических воздействий техногенных взрывов и отвалов вскрышных пород.

Для изучения геомеханических процессов в массиве горных пород разработана модель, представленная на рис. 1 в виде вертикального сечения по линии залегания пластов. На модели представлены следующие объекты: обрабатываемые угольные пласты 1 и 2, открытые и подземные выработки, отвалы вскрышных пород, граница лицензионных участков угольной шахты и разреза, очаги микросейсмических событий. Углы залегания угольных пластов приняты 4-12°. Карьерная выемка имеет средние размеры 5200×1200 м. Отвалы вскрышных пород расположены у границы лицензионного участка шахты.

Открытым способом обрабатывается верхний пласт 1 посредством формирования рабочих уступов по залеганию пласта, внутренних и внешних отвалов вскрышных пород. При техногенных взрывах на разрезе возникает очаг микросейсмических событий 3. Нижний пласт 2 обрабатывается подземным способом длинными комплексномеханизированными забоями с оставлением между выемочными столбами угольного целика шириной 40 м. При возникновении горного удара и разрушении угольного целика возникает очаг микросейсмических событий 1. В случае зависания подработанных пород кровли в очистном выработанном пространстве возможно геодинамическое явление 2 с разрушением краевой части обрабатываемого угольного столба. В модели возможен учет природного глубинного микросейсмического события 4.

Математическая модель сформулирована на основе дифференциальных уравнений механики сплошной среды, энергетической теории разрушения горных пород, волновой теории распространения упругих волн при техногенных взрывах на угольных разрезах.

Исследования проводились посредством численного моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива в пределах горных отводов шахты и разреза с учетом взаимного влияния системы открытых и подземных выработок.

Моделирование геомеханических и микросейсмических процессов осуществлялось с использованием авторского комплекса проблемно-ориентированных про-

грамм [12]. Для оценки результатов использованы данные мониторинга сейсмической активности в Кузбассе, полученные по датчикам системы GITS и Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Программа исследований геомеханического и геодинамического состояния массива горных пород при взаимодействии объектов угольной шахты и разреза включала проведение вычислительных экспериментов и выявление индикаторов и значимых факторов, влияющих на геодинамические процессы в массиве горных пород и безопасность горных работ.

В каждом конечном элементе определялись вертикальные и горизонтальные напряжения, вертикальные и горизонтальные смещения, отношение остаточной прочности к исходной, энергия формоизменения при деформировании горных пород.

В процессе моделирования было установлено, что максимальное влияние микросейсмические события оказывают на устойчивость угольного целика между отработанными и обрабатываемым выемочным столбом, а также на изменения опорного горного давления в угольном пласте впереди очистного забоя. Поэтому приведены результаты моделирования для этих участков.

Для оценки устойчивости подземных выработок рассматривались два варианта: при отсутствии угольного разреза (горизонтальная земная поверхность) и в случае производства на нем горных работ.

На рис. 2 показаны графики вертикальных напряжений в угольном целике без учета влияния технологических взрывов на угольном разрезе. Правая часть целика расположена на границе с обрабатываемым выемочным столбом, а левая – с ранее отработанными столбами пласта 2 (см. рис. 1). Согласно графикам, влияние открытых выработок и пород вскрыши разреза на изменения сжимающих напряжений в угольном целике между подземными выработками незначительное. Такие же выводы получены и при анализе графиков распределения

вертикальных смещений пород, отношения остаточной прочности к исходной.

По результатам численного моделирования установлено, что наиболее существенное влияние на устойчивость подземных выработок и угольных целиков оказывают технологические взрывы. Для этого рассмотрены динамические деформационные процессы в виде микроземлетрясений [13], при которых излучается сейсмическая энергия не более 5·10⁷ Дж.

Для вычислительного эксперимента распространения в массиве горных пород сейсмических волн в расчетной модели принята синусоидальная форма функции колебания точек при воздействии поперечных волн [14]:

$$w = A \left(\frac{R-x}{R} \right)^n \sin \left(2\pi \frac{x}{s \left(\frac{R+x}{R} \right)^m} + \varphi_0 \right) \quad , (1)$$

где *w* – вертикальные колебания точки в геомассиве под влиянием поперечной сейсмической волны, *m*; *A* – максимальная амплитуда колебания точки, *m*; *s* – длина волны, *m*; *R* – максимальный радиус влияния источника сейсмической волны при *w* → 0, *m*; *x* – координата, расстояние от источника сейсмической волны до точки в массиве горных пород, *m*; φ_0 – фаза; *m*, *n* – показатели степени затухания сейсмической волны.

Указанные в формуле (1) параметры зависят от многих факторов: упругих свойств, напряженно-деформированного состояния, трещиноватости, плотности горных пород и др. [2, 13, 14]. Поэтому рекомендуется величины *R*, *m*, *n*, *s* определять посредством численного решения системы уравнений для точек в массиве горных пород при известных значениях *w*, *A*, *x*, измеренных с помощью датчиков автоматизированной системы мониторинга геомеханических процессов, например GITS [2] или Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

После статистической обработки результатов мониторинга параметров сейсмичности для условий шахт и разрезов южного Кузбасса получены величины: максимальная амплитуда колебания точки, *A* = 0,001-0,020 м; длина волны *s* = 5-300 м; фаза φ_0 = 0; *m* = *n* = 1,5.

При распространении волны колеблющиеся частицы не перемещаются вместе с распространяющейся в массиве упругой волной и колеблются около своих положений равновесия [13, 14].

Учитывая, что отношения геомеханических параметров при волновых процессах и при их отсутствии отличаются незначительно, для анализа результатов исследований рассматривается разность величин, полученных без учета влияния технологических взрывов и вычисленных с учетом влияния сейсмических волн при единичном взрыве.

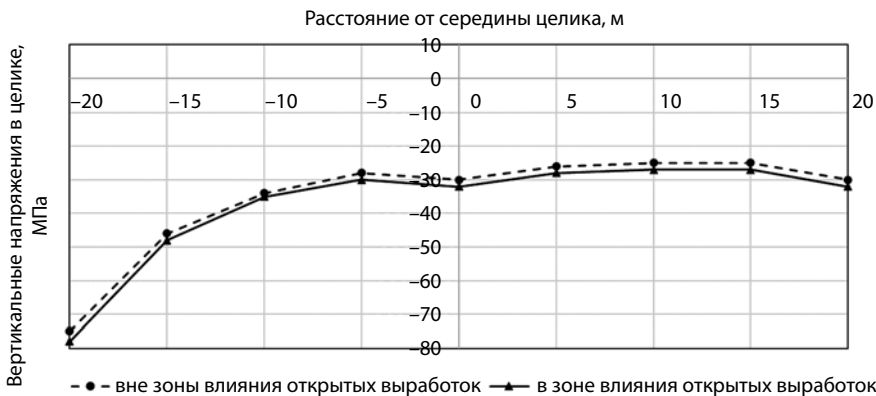


Рис. 2. Графики распределения вертикальных напряжений (МПа) в угольном целике между выемочными столбами при совместном влиянии открытых и подземных выработок

Fig. 2. Plots of vertical stress distribution (MPa) within the coal pillar between the mine pillars under the joint impact of the surface and underground mine workings

Расчет отклонений параметров проводился по формуле:

$$d_{om} = \frac{P_v - P_0}{P_c}, \quad (2)$$

где d_{om} – относительная разность значений параметров; P_0 – значение параметра при отсутствии влияния взрыва; P_v – значение параметра при прохождении взрывной волны; P_c – среднее значение параметра при отсутствии влияния взрыва.

На рис. 3 показан график изменения вертикальных смещений пород при прохождении сейсмической волны при технологическом взрыве.

Аналогичные графики получены при изменении вертикальных напряжений (рис. 4).

Согласно графикам (см. рис. 3, 4), подтверждается синусоидальный закон прохождения сейсмической волны. Колебания точек в угольном пласте под влиянием сейсмической волны достигают 22-24 мм. Максимальные относительные вертикальные смещения, вычисленные по формуле (2), не превышают 8% от полных вертикальных смещений. Происходит увеличение оседаний кровли угольного пласта, что приведет к росту вертикальных напряжений. Возможна пульсация точек в пласте с разгрузкой его до ± 5 мм. Знакопеременные изменения вертикальных смещений способствуют формированию системы трещин и разрушению угля.

На практике в угольных шахтах эпизодически возникают явления в виде разрушений крепи выработок в зонах активизации процессов обрушения подработанных пород кровли на соседних выемочных участках, разрушения краевой части обрабатываемого пласта в очистном забое и угольных целиках, на сопряжении выработок, при пересечении очистным забоем передовых выработок. Процессы многократного воздействия импульсов на объект можно объяснить в соответствии с теорией многоциклового усталости материалов, согласно которой усталость и разрушение возникают при напряжениях, которые намного меньше предела текучести [15].

По результатам исследований, при наличии графика проведения технологических взрывов на угольных разрезах, прогноза участков обрушения подработанных пород кровли и разрушения угольных целиков в выемочных панелях, предлагается проводить моделирование геомеханических и геодинамических процессов для предотвращения опасных производственных ситуаций посредством изменения графиков проведения взрывных работ на разрезах и движения очистных работ на угольных шахтах.



Рис. 3. График изменения вертикальных смещений пород под влиянием сейсмической волны при технологическом взрыве на угольном разрезе, мм

Fig. 3. A plot of vertical rock displacement changes due to a seismic wave caused by a technological blast at the strip coal mine, mm



Рис. 4. График изменения вертикальных напряжений в зоне опорного горного давления впереди лавы под влиянием сейсмической волны при технологическом взрыве, МПа

Fig. 4. A plot of vertical stress changes in the abutment zone ahead of the mining face under the impact of a seismic wave caused by a technological blast, MPa

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного моделирования геомеханических процессов в массиве горных пород при одновременной обработке угольных пластов открытым и подземным способами установлено, что влияние открытых горных выработок и отвалов вскрышных пород угольного разреза возрастает по мере приближения фронта подземных горных работ к открытым горным выработкам. Однако это влияние при отсутствии воздействия технологических массовых взрывов на разрезе варьирует для разных геомеханических параметров $\pm 8\%$ и существенно не снижает уровень безопасности подземных горных работ.

Результаты исследований рекомендуются для создания в сейсмоактивных районах Кузбасса технологии обработки трудноизвлекаемых запасов: на верхнем горизонте – открытым способом; на втором и третьем горизонтах – комбинированным способом; на глубине залегания угольных

пластов более 800 м предлагаются разработка и реализация природоподобных геотехнологий с применением физических методов и комплексного извлечения недр в виде угля и метана.

Список литературы • References

1. Сопровождение сейсмической станции АО «ОУК Южжубассу-голь». Отчет о научных исследованиях и опытно-конструкторских разработках, договор ДГЮК7-009012 от 01.01.2020. III, IV кварталы, Алтае-Саянский филиал ФИЦ ЕГС РАН; рук. А.А. Еманов. Новосибирск, 2020. 188 с.
2. Панин С.Ф. Особенности проявлений сейсмических активизаций на шахтах Кузбасса и организация сейсмического контроля за состоянием недр. Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. Сб. научных статей. Новокузнецк: СибГИУ, 2013. С. 259-263.
3. Семенова И.Э., Аветисян И.М. Оценка параметров взаимного влияния открытых и подземных горных работ в сложных геомеханических условиях // Горный журнал. 2021. № 1. С. 28-33. Semenova I.E., Avetisyan I.M. Estimation of open-pit / underground mining cross-effect in complicated geomechanical conditions. *Gornyj zhurnal*. 2021;(1):28-33. (In Russ.).
4. Тахтасhev А.Б., Назаров З.С., Мухаммадиев А.Р. Массив горных пород как нелинейная система, в которой происходит сейсмическое воздействие от взрывов на открытых горных работах // *Universum: Технические науки*. 2022. № 2(95). С. 1-4. Takhtashev A.B., Nazarov Z.S., Mukhammadiev A.P. Rock mass as a nonlinear system in which seismic impact from explosions occur in open mining. *Universum: Tekhnicheskie nauki*. 2022;2(95):1-4. (In Russ.).
5. Khan M., He X., Song D., Tian X., Li Z., Xue Y. Extracting and predicting rock mechanical behavior based on microseismic spatio-temporal response in an ultra-thick coal seam mine. *Rock Mech. Rock Eng.* 2023;(56): 3725-3754. DOI: 10.1007/s00603-023-03247-w.
6. Majid Khan, Dazhao Song, Munawar Shah, Zhenlei Li. Evaluation, projection, and prevention of dynamic geological disasters: advances and applications of geophysical methods and numerical modeling. *Frontiers in Earth Science*. 2023;(11). <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1272107>.
7. Qun Yu, Danchen Zhao, Yingjie Xia, Shengji Jin, Jian Zheng, Qingkun Meng, Chaoqian Mu and Jingchi Zhao. Multivariate Early Warning Method for Rockburst Monitoring Based on Microseismic Activity Characteristics. *Frontiers in Earth Science*. 2022;10:837333. DOI: 10.3389/feart.2022.837333.
8. Du J., Chen J., Pu Y., Jiang D., Chen L., Zhang Y. Risk Assessment of Dynamic Disasters in Deep Coal Mines Based on Multi-Source, MultiParameter Indexes, and Engineering Application. *Process Saf. Environ. Prot.* 2021;(155):575-586. DOI: 10.1016/j.psep.2021.09.034.
9. Wang C., Si G., Zhang C., Cao A., Canbulat, I. Location Error Based Seismic Cluster Analysis and its Application to Burst Damage Assessment in Underground Coal Mines. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2021;(143):104784. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2021.104784.
10. Xie H., Li C., He Z., Li C., Lu Y., Zhang R. et al. Experimental Study on Rock Mechanical Behavior Retaining the In Situ Geological Conditions at Different Depths. *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* 2021;(138):104548. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104548.
11. Геодинамическое районирование Южного Кузбасса / Т.И. Лазаревич, В.П. Мазикин, И.А. Малый и др. Кемерово: Научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела – межотраслевой научный центр ВНИМИ. Кемеровское Представительство, 2006. 181 с.
12. Фрянов В.Н., Павлова Л.Д., Цветков А.Б. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020618595. Программный комплекс для моделирования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при взаимном влиянии системы подземных горных выработок. ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т, Фед. служба по интеллек. собств., дата регистр. 30 июля 2020.
13. Горная геомеханика / В.Б. Артемьев, Г.И. Коршунов, А.К. Логинов и др. СПб.: Наука, 2011. 102 с.
14. Тюпин В.Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных горных массивах. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. 192 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vzryvnye-i-geomechanicheskie-processy-v-treshchinovatyh-napryazhennyh-gornyh-massi.pdf> (дата обращения: 15.10.2024).
15. Методика прогнозирования прочности углей / С.Е. Чирков, Б.К. Норель, М.П. Мохначев и др. М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1981. 29 с.

Authors Information

Pavlova L.D. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation, e-mail: ld_pavlova@mail.ru

Fryanov V.N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Departments of Geotechnology, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Nikitenko S.M. – Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Laboratory of Coal Engineering, Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, e-mail: nsm.nis@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024