Оригинальная статья

УДК 622.86:622.83 © А.А. Соболев✉[1,3], Хэ Сюэцю[2], Мэн Шанцзю[1], Сонг Дачжао[2], Чжэньлэй Ли[2], Цинь Ифэн[1], Ван Тао[1], Гао Ся[1], 2026

[1] Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР
[2] Пекинский научно-технический университет (ПНТУ), 100083, г. Пекин, КНР
[3] Хабаровский федеральный исследовательский центр ДВО РАН (ХФИЦ ДВО РАН), 680000, г. Хабаровск, Россия
✉ e-mail: alexsoboll@mail.ru

Original Paper

UDC 622.86:622.83 © A.A. Sobolev✉[1,3], He Xueqiu[2], Meng Shangjiu[1], Dazhao Song[2], Zhenlei Li[2], Qin Yifeng[1], Wang Tao[1], Gao Xia[1], 2026

[1] Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China
[2] University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, 100083, China
[3] Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, 680000, Russian Federation
✉ e-mail: alexsoboll@mail.ru

Исследование проблемы горных ударов на угольных шахтах КНР*

Investigation of rockbursts occurred in China's underground coal mines

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-1-115-120

Работа посвящена вопросам безопасности при подземной отработке запасов угля, в ней проанализировано текущее состояние и выявлены перспективы к увеличению объемов ежегодной мировой добычи угля шахтным способом. Выполнен системный анализ горных ударов, произошедших на угольных шахтах КНР, отмечено значительное увеличение их числа при отработке угольных пластов на неглубоких горизонтах до 400 м, описан механизм возникновения и развития геодинамических явлений в приконтурном массиве очистного забоя и сопряжениях лавы с ярусными штреками, определены энергетические параметры триггерных геодинамических процессов в породах кровли, исследован характер и описана зависимость уровня энергии разрушения конвейерного штрека от расстояния до очистного забоя по длине разрушенной выработки.

Ключевые слова: *добыча угля, шахта, безопасность, горный удар, горное давление, напряжение, разрушение, контроль, мониторинг.*

Для цитирования: Соболев А.А., Хэ Сюэцю, Мэн Шанцзю, Сонг Дачжао, Чжэньлэй Ли, Цинь Ифэн, Ван Тао, Гао Ся. Исследование проблемы горных ударов на угольных шахтах КНР // Уголь. 2026;(1):115-120. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-115-120.

Abstract

The paper is devoted to safety issues during underground coal mining, it analyzes the current state and identifies prospects for increasing the volume of annual global coal production by underground mining method. An analysis of the rock bursts that occurred in the coal mines of the People's Republic of China was performed and an annual increase in their numbers during the mining of coal seams at shallow depth up to 400 m was noted. Solving the problem of sudden

СОБОЛЕВ А.А.
Канд. техн. наук, докторант, Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР, ведущий научный сотрудник, ХФИЦ ДВО РАН, 680000, г. Хабаровск, Россия, e-mail: alexsoboll@mail.ru

ХЭ СЮЭЦЮ
Профессор, Пекинский научно-технический университет (ПНТУ), 100083, г. Пекин, КНР, e-mail: hexq@ustb.edu.cn

МЭН ШАНЦЗЮ
Профессор, ректор, Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР, e-mail: iemmsj@163.com

СОНГ ДАЧЖАО
Профессор, Пекинский научно-технический университет (ПНТУ), 100083, г. Пекин, КНР, e-mail: songdz@ustb.edu.cn

* *Исследование выполнено при поддержке Национального Фонда Естественных Наук Китая №№ 52374199; 52374180, Фонда Естественных Наук Провинции Хэйлунцзян КНР № ZD2023E008.*

ЧЖЭНЬЛЭЙ ЛИ
Доцент, Пекинский научно-технический университет (ПНТУ), 100083, г. Пекин, КНР, e-mail: lizhenlei@ustb.edu.cn

ЦИНЬ ИФЭН
Аспирант, Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР, e-mail: qyf18852935131@126.com

ВАН ТАО
Доцент, Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР, e-mail: hitwangtao@126.com

ГАО СЯ
Доцент, Хэйлунцзянский научно-технический университет (ХНТУ), 150027, г. Харбин, КНР, e-mail: klgaoxia1984@163.com

rock pressure release in a dynamic form the nature of occurrence and the mechanism of geodynamic phenomena development including the energy parameters of trigger geodynamic processes in strata rocks have been described and determined. Dependency of the destruction energy level of the conveyor drift on the distance to the working face along the length of the destroyed mine working is investigated and described.

Keywords
Coal mining, underground mine, safety, rock pressure, stress distribution, destruction, rockburst, strata control, monitoring.
Acknowledgments
This research was supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 52374199 and 52374180) and the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (No. ZD2023E008).
For citation
Sobolev A.A., He Xueqiu, Meng Shangjiu, Dazhao Song, Zhenlei Li, Qin Yifeng, Wang Tao, Gao Xia. Investigation of rockbursts occurred in China's underground coal mines. *Ugol'*. 2026;(1):115-120. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-1-115-120.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мировой практике добычи угля сложились две разнонаправленные тенденции. В некоторых экономически развитых районах и странах наблюдается сокращение добычи угля шахтным способом. Так в США в период с 1994 по 2017 г. количество угольных шахт сократилось на 79%, Германия закрыла свою последнюю угольную шахту Prosper-Haniel в 2018 г., а на Тайване длившаяся на протяжении порядка 125 лет и берущая свое начало еще в 1876 г. с эксплуатации династией Цин месторождений района Keelung добыча угля подземным способом была прекращена в 2000 г. [1, 2, 3]. В то же время из-за постоянно растущей потребности в энергоносителях и высоких мировых цен на углеводородное сырье добыча угля в развивающихся странах по-прежнему остается на высоком уровне и продолжает ежегодно расти. Ввиду ограниченности приповерхностных запасов угля в общей структуре добычи преобладает подземный способ разработки, на долю которого, в частности в КНР, приходится в среднем 87% общего ежегодного объема добычи и 98% числа всех угледобывающих предприятий [4].

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДОБЫЧИ УГЛЯ В КНР

КНР занимает лидирующую позицию в мире по объемам ежегодной добычи угля, которая превысила в 2021 г. 4 млрд т и достила к 2024 г. показателя 4,76 млрд т. Ежегодное увеличение добычи связанно с растущим энергопотреблением в сочетании с ограниченностью собственных запасов нефти и газа. По разным оценкам, за последние 5 лет на долю угля приходилось в среднем порядка 70% общего объема производимой энергии, в то время как нефть и газ обеспечивали лишь 7% и 6% соответственно, прогнозируется, что данные показатели сохранятся в ближайшей и среднесрочной перспективе [3, 4]. Добыча угля ведется практически во всех провинциях и автономных районах Китая *(рис. 1)*, является основой энергетической безопасности для бесперебойного функционирования экономики, гарантирует энергетическую стабильность и независимость страны.

Свыше 50% объема всего угля добывается в трех основных угледобывающих провинциях: Shanxi, Inner Mongolia, Shaanxi *(см. таблицу)*, в структуре производства насчитывается 3373 предприятия при средней производственной мощности 0,93 млн т в год, 41 объект мощностью свыше 10 млн т угля в год (25 шахт и 16 открытых угольных разрезов), обеспечивающих 11% всей добычи, и 1181 мелкое предприятие с годовой добычей менее 300 тыс. т в год (1176 подземных предприятий и 5 разрезов), что составляет 35% от общего числа угледобывающих предприятий, на которые приходится лишь 4,5% от общего объема добычи.

Основные угледобывающие провинции КНР

The main coal mining provinces of China

Провинция	Количество угледобывающих предприятий, ед.	Основной тип добываемого угля	Ежегодная добыча, млн т	Подземным способом, млн т	Открытым способом, млн т
Shanxi	616	Антрацит	963,2	894,6	68,6
Inner Mongolia	357	Бурый (Лигнит)	853,95	559	294,95
Shaanxi	231	Коксующийся	443,78	443,78	0

Мелкие предприятия (менее 0,3 млн т в год) сосредоточены в основном в южных и северо-восточных регионах страны, добыча угля в таких небольших масштабах вызывает серьезные проблемы с безопасностью, экономикой и экологией, в связи с чем в настоящее время правительством принимаются меры по постепенному закрытию предприятий мощностью менее 0,3 млн т в год и сокращению числа шахт производительностью 0,3-1 млн т в год с одновременным увеличением доли крупных предприятий производительностью более 1 млн т в год до 70% с целью повышения уровня механизации, информатизации, автоматизации и интеллектуализации на угольных предприятиях.

Рис. 1. Региональное распределение угледобывающих предприятий по районам и провинциям КНР ([3] с дополнениями)

Fig. 1. Regional distribution of coal mining in China by average annual company's production ([3] with additions)

ПРОБЛЕМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ФОРМЕ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ КНР

С постоянным увеличением объемов добычи угля растет глубина отработки запасов, которая в настоящее время на некоторых шахтах Китая превышает 1,2 км при средней длине забоя лавы 350-450 м [5], ухудшаются горнотехнические условия разработки, увеличивается число объектов склонных к опасным геодинамическим проявлениям горного давления *(рис. 2)*, суммарное число которых на сегодняшний день составляет 140 функционирующих и 40 законсервированных удароопасных шахт [6].

Горные удары стали существенным фактором, влияющим на безопасность жизни шахтеров и нормальную работу предприятий, приводя к человеческим жертвам, повреждениями горных выработок и оборудования, серьезным материальным потерям. Так, произошедший 22 февраля 2020 г. на шахте Xinjulong Coal Mine, Shandong Province горный удар привел к гибели четырех горнорабочих и финансовым потерям в 18,5 млн юаней [7].

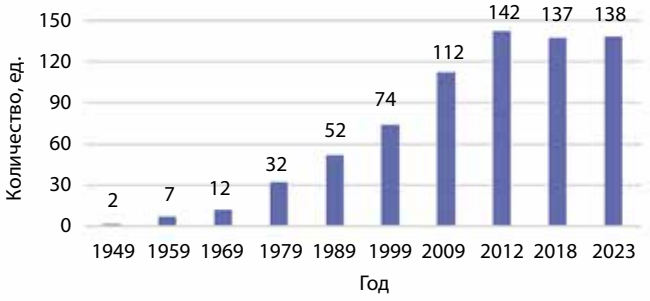

Рис. 2. Динамика изменения количества действующих удароопасных угольных шахт в КНР

Fig. 2. Dynamics of changes in the number of burst-prone coal mines in China

Горно-геологические условия подземной добычи угля в Китае считаются наиболее сложными в мире [6], углы падения отрабатываемых угольных пластов достигают 90° при толщине свыше 20 м (месторождение Удун), зачастую перекрываются трудно обрушаемой кровлей из прочных пород (месторождение Куангоу), что в совокупности с высокими концентрациями напряжений в массиве, наведенными интенсивными горными работами, приводящими к значительным нарушениям его целостности, является основной причиной возрастания геодинамических рисков, увеличения числа горных ударов и проявления геодинамической активности на небольших глубинах (Удун – 157 м, Люхуангоу – 350 м, Куангоу – 317 м), а масштабы последствий от обрушения горных пород и разрушения имеют катастрофический характер *(рис. 3)*.

Природно-техногенная сейсмичность и деформационные процессы в угольно-породном массиве являются триггером для еще более опасных вторичных событий, которые могут представлять значительно большую угрозу, чем прямое воздействие горного удара, и привести к внезапным выбросам газа, как это произошло на шахте Sunjiawan на северо-востоке Китая, где в результате вы-

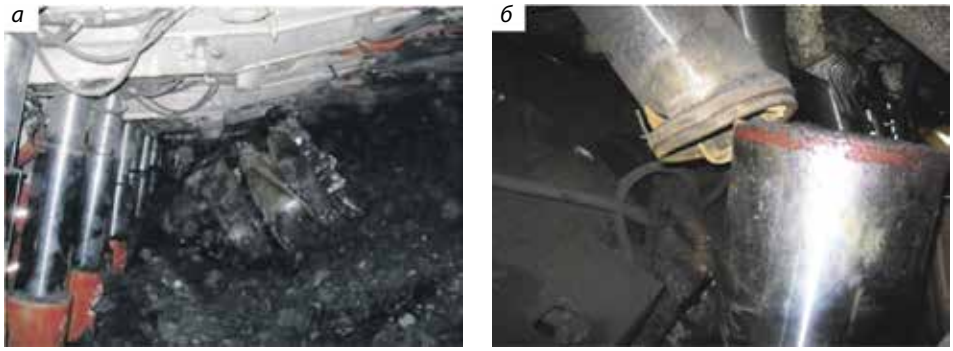

Рис. 3. Последствия горного удара в забое шахты Куангоу при отработке лавы W1143 на глубине 317 м: (а) повреждения выемочного комбайна; (б) повреждения гидравлической стойки механизированной крепи

Fig. 3. Rockburst consequences in the Kuangou coal mine at level 317 m, face W1143: (a) coal cutter damages; (b) hydraulic support damages

броса и взрыва метана погибли 214 шахтеров и 22 получили серьезные травмы. В этой связи при отработке угольных месторождений подземным способом особое внимание должно уделяться геодинамической безопасности при ведении горных работ, контролю горного давления, мероприятиям по прогнозу и предотвращению горных ударов с целью снижения количества аварий, материального ущерба от разрушений, элиминирования рисков травматизма и недопущения новых человеческих жертв на опасных производственных процессах по добыче угля.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОГО УДАРА

С увеличением масштаба проблемы горных ударов пропорционально растет количество исследований, методик и теорий в данной области, разрабатываются и активно внедряются новые технологии и оборудование для прогноза и предотвращения геодинамических аварий [8, 9, 10, 11]. Физика эволюционного процесса горного удара исследована с помощью лабораторных экспериментов [12], в том числе используя современные методы искусственного интеллекта и машинного обучения [13], численного моделирования, теоретического анализа, полевых исследований [14] и другие различные технические средства, методы и технологии [15]. Однако ввиду сложности горно-геологических структур и динамично изменяющихся из-за ведения горных работ геомеханических условий на настоящий момент не существует уникальной теории, которая могла бы полностью объяснить и описать механизм возникновения горного удара, в связи с чем он остается до конца не изучен, что делает актуальными исследования, проводимые в данном направлении.

Считается, что горные удары вызваны наложением статических и динамических напряжений *(рис. 4)*, формируемых совокупностью геостатического давления толщи пород, а также природных и техногенных тектонических и сейсмических процессов. Математически условие для горного удара описывается следующим выражением:

$$\sigma_{ст} + \sigma_{дн} > [\sigma]_{пр}, \quad (1)$$

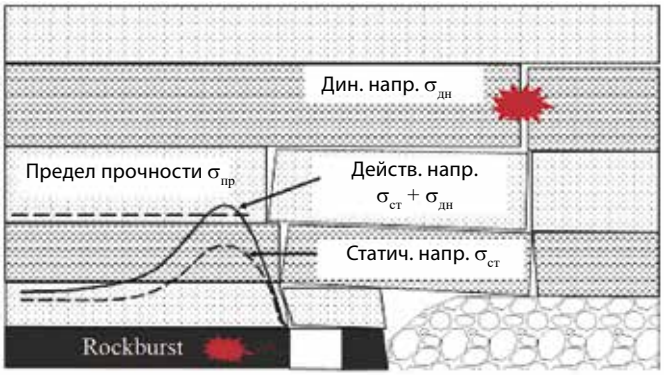

Рис. 4. Характер распределения опорного давления в среднем сечении впереди лавы в условиях удароопасной обстановки

Fig. 4. Stress distribution in the middle section ahead of the face under rock-burst prone conditions

где: $\sigma_{ст}$ – статические напряжения в массиве, формирующиеся под собственным весом вышележащей толщи пород, создающих естественные напряжения; $\sigma_{дн}$ – динамические напряжения, которые могут быть вызваны смещением разломов, разрушением, обрушением, оседанием пород кровли, разрывом и прочими естественными и техногенными макро-, и микропроцессами; $[\sigma]_{пр}$ – предел прочности структурно-неоднородного углепородного массива. Сумма статических и динамических напряжений может привести к динамической форме проявления горного давления и разрушению горных выработок, если превысит критические вследствие их наложения.

Статические напряжения $\sigma_{ст}$ определяются геологическими условиями месторождения и применяемой технологией очистных работ, в то время как динамические $\sigma_{дн}$ являются фактором, который приводит к внезапному увеличению опорного давления до предельной величины, и для достоверного прогноза горных ударов наиболее актуальна задача изучения именно динамических нагрузок $\sigma_{дн}$, вызванных возмущениями естественной среды, концентрацией и перераспределением напряжений в массиве в результате техногенных и естественных процессов. Для угольного месторождения Исин [16] была выявлена минимальная энергия для инициированного

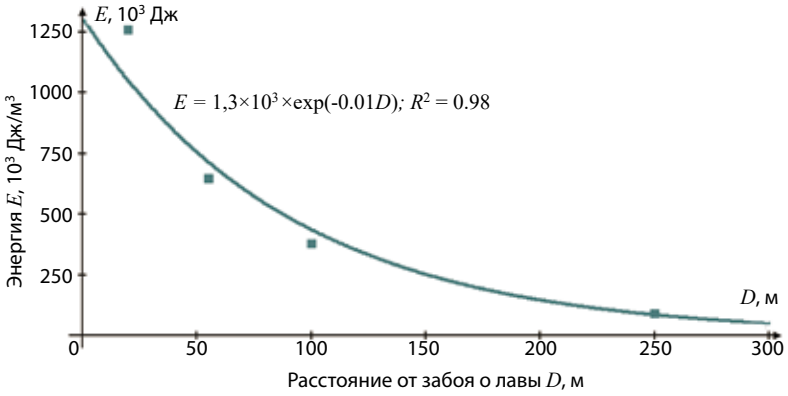

Рис. 5. Зависимость энергии горного удара от расстояния до очистного забоя

Fig. 5. Dependence of the rockburst destruction energy on the distance from the face

горным ударом хрупкого разрушения горных выработок, которая для породного массива прочностью на сжатие 13,5 и 14,6 МПа и с модулем упругости 9 ГПа составила 10,1 и 11,8 КДж соответственно, из чего следует что в прогнозе опасных геодинамических явлений на угольных месторождениях для принятия превентивных мер следует ориентироваться на триггерные события с энергией свыше 10 КДж, так как они приводят к мгновенным разрушениям горных выработок, увеличению риска угрозы жизни и здоровью персонала.

Математический расчет, данные инструментального мониторинга, а также исследования характера и масштаба повреждения оборудования и горных выработок позволили определить энергетические параметры разрушения 300 м конвейерного штрека от мощного горного удара, произошедшего 17 января 2017 г. в угольной шахте Danshuigou в провинции Shanxi [14]. Анализ распределения энергии разрушения показал, что в 20 м от забоя лавы № 4203 энергия составляла $1,26 \times 10^6$ Дж/ м^3, 55 м – $6,47 \times 10^5$ Дж/м^3, 100 м – $3,78 \times 10^5$ Дж/м^3, 250 м – $8,95 \times 10^4$ Дж/м^3, что свидетельствует об экспоненциальной зависимости энергии динамического разрушения E от расстояния до очистного забоя D, с коэффициентом корреляции 0,98 *(рис. 5)*.

Характер распределения энергии разрушения свидетельствует о том, что при горных ударах наиболее опасными являются участки конвейерных и вентиляционных ярусных штреков на расстоянии 20-250 м впереди забоя лавы вследствие высокой концентрации напряжений в массиве из-за продвижения очистного забоя, а также динамических нагрузок от обрушения кровли в районе проведения очистных работ. Высокий уровень энергии, накопленной в данном участке массива, предопределил высокую силу горного удара и количество единовременно высвобождаемой энергии, приводящей к сильным разрушениям и катастрофическим последствиям, в связи с чем во время добычных работ особое внимание должно уделяться ударобезопасности и контролю напряженно-деформированного состояния массива вблизи призабойного пространства лавы.

ВЫВОДЫ

Процесс деформации массива горных пород, подверженных постоянным интенсивным изменениям вследствие проводимых горных работ, весьма сложен, в связи с этим при прогнозе горных ударов необходимо комплексно подходить к решению задачи предупреждения и оценивать динамические и статические напряжения в массиве, так как именно концентрации высоких напряжений и геодинамические события свыше 10 кДж являются основным фактором, который обеспечивает источник энергии для возникновения горных ударов при ведении горных работ на небольших глубинах 150-300 м. Выполненные исследования геодинамических условий проявления горных ударов на угольных шахтах КНР показали, что: наиболее опасными при горных ударах являются участки конвейерных и вентиляционных ярусных штреков на расстоянии 20-250 м впереди забоя лавы, что соответствует участку с максимальной величиной опорного давления во время проведения очистных работ; интенсивные горные работы создают условия для горных ударов с высокой энергией, достигающей 10^6 Дж/ м^3, которые приводят к обрушению кровли и серьезному повреждению ярусных штреков; энергия разрушения при горном ударе демонстрирует экспоненциально затухающий характер по длине разрушенной выработки и коррелирует с величиной напряжений, действующих в приконтурном массиве. В этой связи для предупреждения опасных геодинамических явлений необходимо принимать превентивные меры предосторожности, контролировать напряженно-деформированное состояние массива с помощью геофизических систем автоматизированного мониторинга с целью определения критического состояния горнотехнических систем, прогноза и предотвращения внезапных деформационных процессов.

Список литературы • References

1. Blondeel M., Van de Graaf T. Toward a global coal mining moratorium? A comparative analysis of coal mining policies in the USA, China, India and Australia. *Climatic Change*. 2018;150(1):C. 89-101.
2. Shekarian Y., Rahimi E., Shekarian N., Rezaee M., Roghanchi P. An analysis of contributing mining factors in coal workers' pneumoconiosis prevalence in the United States coal mines, 1986-2018. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2021;(8):1227-1237.
3. Liu X., Li L., Yang Y. Development status of coal mining in China. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2023;123(1):19-28.
4. Wang G., Xu Y., Ren H. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019;29(2):161-169.
5. Kang H., Wang G., Jiang P., Wang, J., Zhang, N., Jing H., Wang Z., Kang H. et al. Conception for strata control and intelligent mining technology in deep coal mines with depth more than 1000 m. *Journal of China Coal Society*. 2018;(7):1789-1800.

6. Pan Y., Song Y., Luo H. et al. Coalbursts in China: Theory, practice and management. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 2024;16(1):1-25.
7. Zhou J., Zhang Y., Li C., He H., Li X. Rockburst prediction and prevention in underground space excavation. *Underground Space*. 2024;(14):70-98.
8. Du K., Bi R., Khandelwal M. et al. Occurrence mechanism and prevention technology of rockburst, coal bump and mine earthquake in deep mining. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2024;10(1):98.
9. Использование геофизических методов мониторинга для локального контроля напряженно-деформированного состояния массива / А.А. Соболев, Хэ Сюэцю, Мэн Шанцзю и др. // Уголь. 2024;(9):47-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-47-52.
Sobolev A.A., He Xueqiu, Meng Shangjiu, Dazhao Song, Zhenlei Li, Qin Yifeng. The use of geophysical monitoring methods for local ground stress control. *Ugol'*. 2024;(9):47-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-47-52.
10. He M., Cheng T., Qiao Y., Li H. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2023;15(5):1312-1353.
11. О геодинамической безопасности горных работ в удароопасных условиях на примере Хибинских апатитовых месторождений / А.А. Козырев, В.И. Панин, И.Э. Семенова и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. №. 5. С. 33.
Kozyrev A.A., Panin V.I., Semenova I.E., Zhuravleva O.G. On geodynamic safety of mining operations in rock-bump hazardous conditions using the case study of Khibiny apatite deposits. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh.* 2018;(5):33. (In Russ.).
12. LI Z., Li N., Yang F. et al. Applying feature extraction of acoustic emission and machine learning for coal failure forecasting. *Chinese Journal of Engineering*. 2023;45(1):19-30.
13. Wang H., Li z., Song D. et al. An intelligent rockburst prediction model based on scorecard methodology. Minerals. 2021;(11):1294.
14. Ma Z., Zhao X., Li S. Mechanism of rockburst induced by roadway repair under intense mining: a case study. *Frontiers in Earth Science*. 2024;(12):1387797.
15. Xue Y., Song D., Chen J. et al. Integrated rockburst hazard estimation methodology based on spatially smoothed seismicity model and Mann-Kendall trend test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023;(163):105329.
16. Pang J., Yang X., Yang A. et al. A method for dividing rockburst risk zones – A case study of the Hegang Mining Area in China. *Sustainability*. 2023;15(20):14808.

Authors Information
Sobolev A.A. – PhD (Engineering), Doctoral, Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China,
Leading Researcher, Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (KhFRC FEB RAS), Khabarovsk, 680000,
Russian Federation, e-mail: alexsoboll@mail.ru

He Xueqiu – Professor, University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, 100083, China, e-mail: hexq@ustb.edu.cn

Meng Shangjiu – Professor, President, Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China, e-mail: iemmsj@163.com

Dazhao Song – Professor, University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, 100083, China, e-mail: songdz@ustb.edu.cn

Zhenlei Li – Associate Professor, University of Science and Technology Beijing (USTB), Beijing, 100083, China, e-mail: lizhenlei@ustb.edu.cn

Qin Yifeng – Postgraduate Student, Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China, e-mail: qyf18852935131@126.com

Wang Tao – Associate Professor, Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China, e-mail: hitwangtao@126.com

Gao Xia – Associate Professor, Heilongjiang University of Science and Technology (HUST), School of Civil Engineering, Sino-Russian Joint Laboratory of Smart Mine, Harbin, 150027, China, e-mail: klgaoxia1984@163.com

Информация о статье
Поступила в редакцию: 18.04.2025
Поступила после рецензирования: 17.12.2025
Принята к публикации: 29.12.2025

Paper info
Received April 18, 2025
Reviewed December 17, 2025
Accepted December 29, 2025