

Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь»

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>

МУЛЕВ С.Н.

Директор по науке АО «ВНИМИ»,
199106, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: mulev@vnimi.ru

РУКАВИШНИКОВ Г.Д.

Заведующий центром
геодинамического мониторинга
АО «ВНИМИ»,
аспирант ИГД СО РАН,
199106, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: geodmiruk@gmail.com

МОРОЗ Д.И.

Главный технолог по ГДЯ –
начальник сейсмостанции
АО «Воркутауголь»,
169908, г. Воркута, Россия,
e-mail: di.moroz@vorkuta.severstalgroup.com

ПАШКОВА В.И.

Геофизик АО «Воркутауголь»,
169908, г. Воркута, Россия,
e-mail: Vi.Pashkova@vorkuta.severstalgroup.com

МОРОЗ Н.Е.

Аспирант Санкт-Петербургского
горного университета,
199106, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

В статье приведена историческая справка о развитии системы сейсмического мониторинга «GITS» на шахтах АО «Воркутауголь», описание действующих модификаций системы и перспективы ее дальнейшего развития. Приведены результаты исследований взаимосвязи сейсмической активности с горно-геологическими и техническими условиями добычи. Также в статье представлены результаты численного моделирования для прогнозирования зон повышенного горного давления при зависании основной кровли.

Ключевые слова: Сейсмическая активность, мониторинг динамических явлений, зоны повышенного горного давления, скорость подачи комбайна, выемочный участок, опорное давление, непосредственная кровля, основная кровля, численное моделирование.

Для цитирования: Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь» / С.Н. Мулев, Г.Д. Рукавишников, Д.И. Мороз и др. // Уголь. 2022. № 12. С. 88-93. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка угольных месторождений подземным способом неизбежно связана с образованием пустот в породном массиве на обширных площадях. При ведении очистных работ на большой глубине это приводит к активизации сейсмических процессов [1, 2].

Сейсмическая активность шахтных полей при ведении горных работ зависит от нескольких факторов. Среди них: глубина ведения работ, прочностные характеристики горных пород, способность к накоплению упругой энергии, геологическое строение породного массива, интенсивность ведения очистных и проходческих работ.

Современные очистные комбайны позволяют производить выемку угольного пласта с большой скоростью, в результате в зоне опорного давления перед забоем возникают высокие напряжения, а в породах кровли возникают зависания. Такое перераспределение напряжений приводит к динамическим явлениям, обрушениям горных пород на контурах выработок и в призабойной части пласта [3, 4].

Обрушение горных пород на угольных шахтах также вносит наибольший вклад в производственный травматизм [5, 6, 7]. В этой связи прогнозирование зон повышенного горного давления и непрерыв-

ный сейсмический мониторинг опасных участков являются особо актуальными для обеспечения безопасного ведения горных работ [8].

Для прогноза геомеханической обстановки широкое применение находит метод численного моделирования с использованием CAE-пакетов [9, 10, 11]. Сейсмический мониторинг, в свою очередь, реализуется при помощи инструментальных наблюдений с использованием систем мониторинга, таких как GITS, причем особую роль играет принцип обработки данных [12,13].

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ШАХТАХ АО «ВОРКУТАУГОЛЬ»

Первая система сейсмического мониторинга ГИТС (GITS) была установлена в конце 2005 г. на шахте «Комсомольская», и в 2008 г. введена в промышленную эксплуатацию система на шахте «Северная». Сеть датчиков, охватывающая все шахтное поле, получила название системы регионального контроля

В 2019 г. на шахте «Комсомольская» помимо действующей региональной сети датчиков, в соответствии с разработанным проектом АО «ВНИМИ», была смонтирована локальная сеть датчиков с целью выполнения более эффективного сейсмического контроля при проведении очистных работ пласта «Четвертого», опасного по горным ударам. Локальная система «GITS-L» выполняла контроль сейсмоактивности горного массива по контуру лавы № 211-ю пл. «Четвертого» и лавы № 311-ю пл. «Четвертого» до 2021 г. в опытно-промышленном режиме, что позволило наработать необходимые критерии при использовании данных регистрации для более точного определения оценки степени опасности при отработке пл. «Четвертого».

Таким образом, с 2019 г. контроль сейсмоактивности горного массива в пределах шахтного поля СП «Шахта «Комсомольская» стал осуществляться региональной и локальной системами «GITS».

В 2020-2021 годах при участии технического директора АО «Воркутауголь» С.Н. Ногаева системами регионального и локального контроля ГИТС были оснащены шахты «Воркутинская» и «Заполярная».

В качестве примера расположения сети датчиков по шахтному полю приведена схема сети регионального контроля на шахте «Воркутинская» (рис. 1).

В результате был реализован проект системы сейсмического контроля АО «Воркутауголь» для шахт: «Комсомольская», «Воркутинская», «Заполярная». Создан Региональный центр геодинамического и сейсмического контроля – РЦГСК. РЦГСК объединил шахтные сейсмостанции в единое информационное пространство (рис. 2), что позволило приступить к комплексной интерпретации

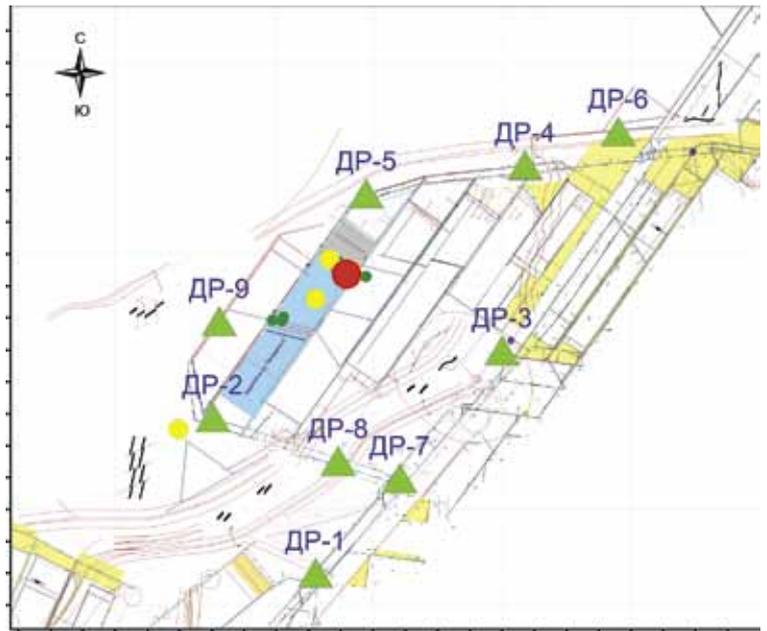


Рис. 1. Пример расположения датчиков региональной сети шахты «Воркутинская»



Рис. 2. Структура информационного пространства РЦГСК.

поступающей информации о сейсмической и геодинамической обстановке в пределах всего месторождения, обрабатываемого АО «Воркутауголь».

РЦГСК обеспечивает непрерывную работу всех шахтных сейсмических сетей: обработку и хранение информации, своевременный ремонт кабельных линий, профилактику и замену выносных подземных модулей, базовых регистрирующих модулей системы, функционирование компьютеров обработки и оргтехники. Своевременное донесение информации о сейсмоактивности согласно разработанным Критериям определения степени опасности (ежегодно определяемым по расчетам АО «ВНИМИ») до лиц, ответственных за безопасность отработки месторождения.

РЦГСК выделен в отдельную структурную единицу, подчиняющуюся технической дирекции АО «Воркутауголь», имеет постоянную связь с РГТИ Печорского округа.

СИСТЕМА ЛОКАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ GITS-L

Как было сказано выше, до 2019 г. наблюдения за сейсмоактивностью в пределах шахты «Комсомольская» выполнялись с помощью системы регионального сейсмического контроля GITS. Система дает возможность выделять и контролировать зоны повышенной сейсмической активности по всему шахтному полю. Разрешающая способность системы позволяет регистрировать сейсмические события в практически неограниченном энергетическом диапазоне, однако минимальная энергия обусловлена плотностью сейсмической сети и составляет порядка 100 Дж.

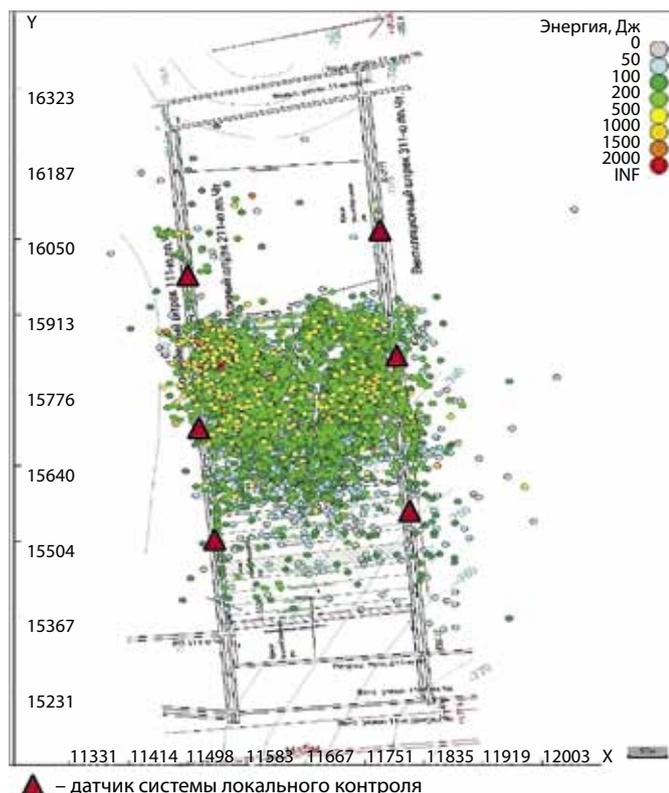


Рис. 3. Сеть датчиков системы локального контроля и гипоцентры сейсмических событий, зарегистрированных за длительный период

В результате анализа данных сейсмо-мониторинга за продолжительный период работы региональной системы (с 2005 г.) было выявлено, что система с такими параметрами сети датчиков не позволяет качественно выполнить основную задачу – прогноз горных ударов и внезапных выбросов.

Опыт сейсмологических наблюдений на глубоких шахтах и рудниках показал, что для решения задачи прогноза крупных сейсмических событий необходимо определять зоны концентрации мелких событий с энергией на три порядка меньше прогнозируемых. То есть, регистрация событий с энергией 100 Дж позволяет прогнозировать события с энергией 100000 Дж. Опасными событиями для шахт АО «Воркутауголь» считаются события с энергией 15000 Дж и выше. Соответственно, для их прогноза нужно регистрировать события с энергией 10 Дж, скопления которых могут оказаться предвестниками опасных динамических явлений (ДЯ).

Таким образом, чтобы решить задачу прогнозирования опасных ситуаций, возникающих в ограниченных объемах породного массива (по контуру горной выработки), сейсмическая сеть должна быть более плотной. Однако организовать достаточно плотную сеть по всему шахтному полю крайне затруднительно технически и экономически невыгодно, и к тому же нецелесообразно, так как не все шахтное поле является опасным по проявлению ДЯ.

В связи с этим в 2019 г. на шахте «Комсомольская» была опробована модификация системы «GITS» для локального контроля (GITS-L), особенностью которой является организация сейсмических павильонов по контуру обрабатываемой лавы (рис. 3).

Локальный контроль предполагает ведение непрерывного мониторинга в высокочастотном диапазоне (от 150 до 1000 Гц), что позволяет регистрировать события в низком энергетическом диапазоне. Плотность сети датчиков повышает точность определения координат мелких сейсмических событий и позволяет контролировать площадь с линейными размерами от 10×10 до 500×500 м. Это обеспечивает контроль проходческих и очистных забоев.

АО «ВНИМИ» был разработан и опробован метод полустационарной схемы установки сейсмоакустических датчиков, позволяющий переносить сейсмические павильоны по мере продвижения очистного забоя лавы. Высокая чувствительность датчиков, широкий частотный диапазон регистрации, схема и процесс расстановки сейсмоакустической сети позволили эффективно вписать систему «GITS-L» в технологический процесс подготовки и отработки добычных участков угольного пласта.

После успешной опытно-промышленной эксплуатации на шахте «Комсомольская» системами «GITS-L» были оснащены шахта «Воркутинская» и шахта «Заполярная». Таким образом, для контроля сейсмоактивности горного массива Воркутской мульды на шахтах АО «Воркутауголь» используются две системы – для регионального контроля динамических явлений и локального прогноза удароопасности. Обе системы являются подсистемами МФСБ шахты.

Дальнейшее развитие систем сейсмического контроля будет направлено на разработку технологии прове-

дения «текущего контроля» удароопасности. Особенностью текущего контроля должна стать возможность наблюдения за колебаниями датчиков в реальном времени. Полезными в данном случае окажутся как естественные сейсмоакустические сигналы, так и сигналы, вызванные в результате внедрения в массив рабочего органа комбайна или бурового инструмента. Будут продолжены исследования по определению степени удароопасности на основе изменения спектральных характеристик вибрационного отклика массива на воздействие режущего инструмента.

ВЗАИМОСВЯЗЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ С ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ ДОБЫЧИ

По данным системы GITS была выявлена зависимость сейсмической активности от скорости продвижения очистного забоя. В качестве примера приводятся данные сейсмической активности лавы № 812-ю пл. «Тройного» шахты «Воркутинская» (рис. 4).

Гистограмма отражает количество зарегистрированных событий каждый месяц, красная пунктирная линия – среднемесячную скорость продвижения очистного забоя лавы. Представленный график наглядно демонстрирует зависимость сейсмической активности от скорости продвижения очистного забоя.

Данные системы локального контроля ГИТС (имеющей более высокую разрешающую способность) позволяют наблюдать процессы вторичной посадки кровли. На рис. 5 представлен график максимальной энергии отдельного сейсмического события в течение суток и даты вторичной посадки кровли (по сведениям геологической службы шахты) для лавы № 211-ю пл. «Четвертого» шахты «Комсомольская».

Для прогнозирования динамических явлений в планы службы прогноза и предотвращения ДЯ АО «Воркутауголь» входит привлечение расчетов, основанных на компьютерном численном моделировании, успешно реализуемых институтом «ВНИИМИ» для широкого ряда геомеханических задач [14].

В качестве примера приводится расчет напряжений в призабойной части угольного пласта и межлавном целике в двух случаях – при полной подбуртовке основной кровли обрушенными породами непосредственной кровли и при недостаточной мощности непосредственной кровли, и, как результат, зависании пород основной кровли на значительной площади.

В результате расчета было получено поле распределения напряжений в исследуемой области (рис. 6).

На рис. 6 представлено сравнение полей распределенной исследуемой величины для обоих случаев. Тонкими черными линиями показаны контуры пласта, выработок, пород кровли, серым цветом – обрушенные породы отработанной ранее лавы. Красные области – наименее напряженные участки массива, синие области – наиболее напряженные.

Результат расчета показывает, что неполная подбуртовка основной кровли на участке ранее отработанной лавы может вызвать высокую концентрацию сжимающих напряжений в межлавном целике и угольном пласте. В зависших породах основной кровли возникают обширные зоны растягивающих напряжений.

Следствием такого распределения напряжений должна стать повышенная сейсмическая активность на участках, где мощности непосредственной кровли не хватает для полного подбурчивания пород основной кровли.

В подтверждение этого вывода приводятся результаты сопоставления карты гипоцентров сейсмических событий с картой мощности непосредственной кровли (рис. 7)

Изолинии на карте отражают мощность непосредственной кровли. Синий цвет – наиболее тонкая пачка непосредственной кровли. Точки на карте – гипоцентры зарегистрированных событий. Черным контуром обведены отработанные лавы. Места скопления большого числа сейсмических событий около межлавных целиков приурочены к участкам малой мощности

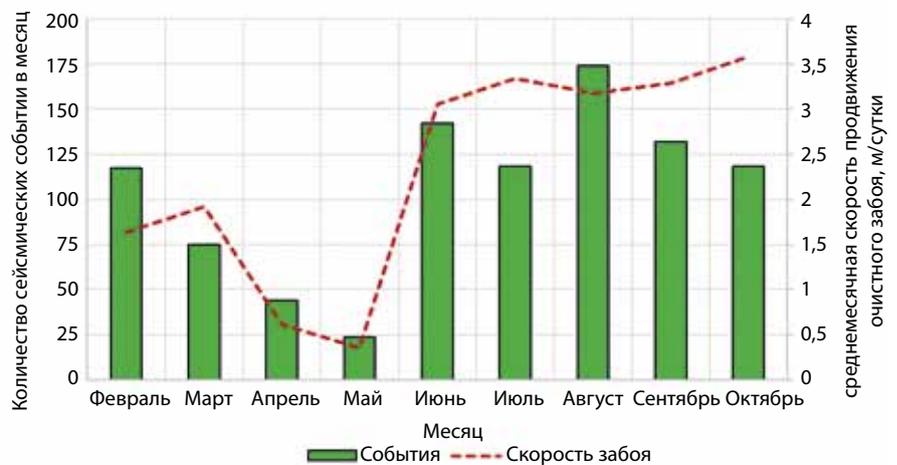


Рис. 4. Скорость продвижения забоя и среднемесячное количество событий

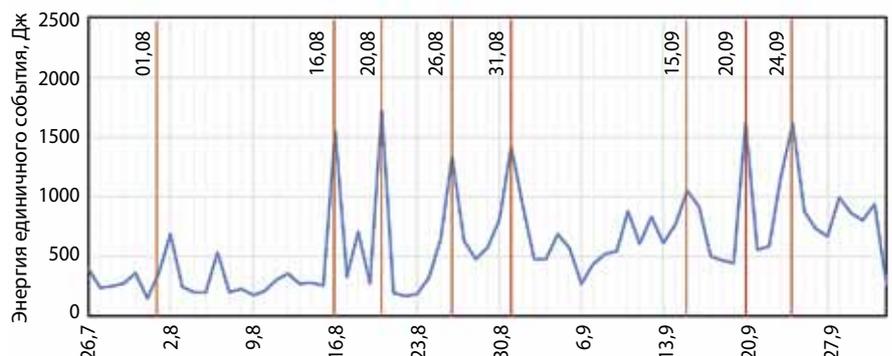


Рис. 5. График максимальной энергии единичного события за сутки (вертикальные линии – даты вторичной посадки кровли)

непосредственной кровли, что хорошо соотносится с результатами численного моделирования, приведенного выше (см. рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере представленного материала демонстрируется, что наилучший подход к контролю напряженно-деформированного состояния массива горных пород складывается из геомеханического прогноза и сейсмического мониторинга.

По мере внедрения и развития на предприятиях АО «Воркутауголь» систем сейсмического мониторинга с привлечением расчетных методов оценки напряженного состояния исследуемая геосреда становится более изученной, и, как следствие, снижается уровень воздействия опасных производственных факторов на персонал и количество незапланированных простоев шахтного оборудования.

Список литературы

1. Лазаревич Т.И., Поляков А.Н., Панин С.Ф. Исследование природы сейсмической активности недр в окрестностях действующих угольных шахт с интенсивным режимом добычи. Сборник научных трудов ВНИМИ. СПб, 2012.
2. К вопросу мониторинга геоэкологической опасности при геодинамическом взаимодействии объектов освоения недр / А.С. Батугин, С.В. Шевчук, С.С. Шерматова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 10-1. С. 63-73.
3. Abdessattar Lamamra, Neguritsa D.L., Eremenko V.A. Justification of Longwall Mining Technology for the Development of Kieselguhr Deposit in Sig Mine, Algeria / IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 609. 2020. 012002.
4. An Improved Numerical Simulation Approach for the Failure of Rock Bolts Subjected to Tensile Load in Deep Roadway / Rui Wang, Jian-biao Bai, Shuai Yan et al. // Geofluids. 2020. Vol. 2. P. 1-21. Article ID 8888390.
5. Обоснование технических решений по снижению производственного травматизма в лавах угольных шахт / С.Г. Гендлер, В.В. Габов, Н.В. Бабырь и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 1. С. 5-19.
6. Structure Partition and Reasonable Width Determination of Waterproof Coal Pillar in Strip Mining / Rui Wang, Jian-biao Bai, Shuai Yan et al. // Lithosphere. 2021. Special 3. 3339797.
7. Разумов Е.А. Оценка факторов сложности условий ведения горных работ на современных угольных шахтах // Уголь. 2019. № 10. С. 16-21. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-16-21.
8. Принципы построения и реализации многофункциональных систем безопасности угольных шахт по обеспечению контроля напряженно-деформированного состояния горного массива / В.М. Вернигор, А.Н. Шабаров, Н.В. Кротов и др. // Записки Горного института. 2013. Т. 205. С. 141-144.
9. Прогноз опасных явлений в пределах рабочих угольных пластов для шахтного поля им. В.Д. Ялевского / А.А. Мешков, А.Л. Попов, Ю.В. Попова и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 2. С. 22-33.
10. Казанин О.И., Ильинец А.А. Обеспечение устойчивости выемочных выработок при подготовке выемочных участков пологих угольных пластов тремя выработками // Записки Горного института. 2022. Т. 253. С. 41-48.
11. Sidorov D.V., Ponomarenko T.V. Rationale behind the design solutions for enhanced oil recovery with the implementation of «PRESS 3D URAL» software / 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017.
12. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической ак-

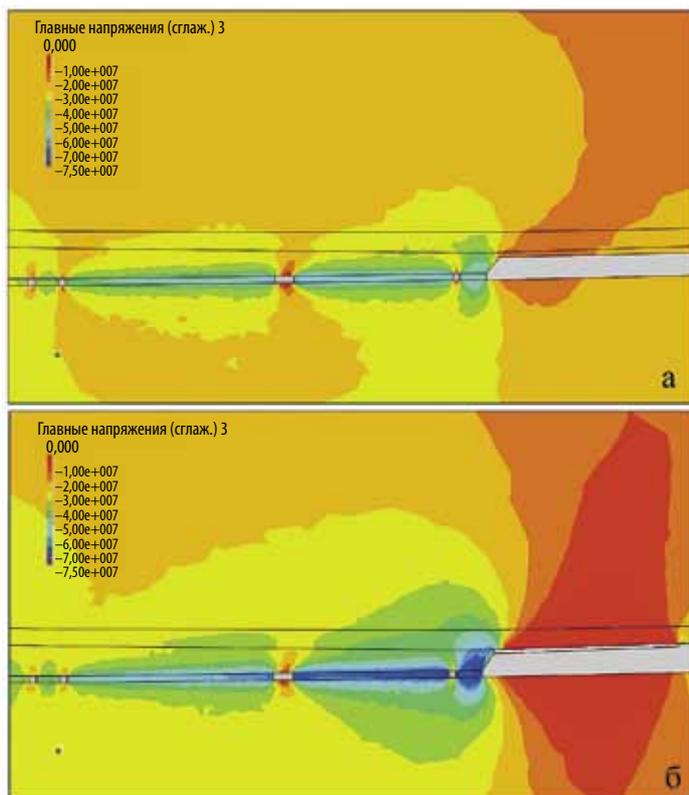


Рис. 6. Распределение сжимающих напряжений: а – в случае опоры кровли на подбutoвку; б – в случае зависания кровли

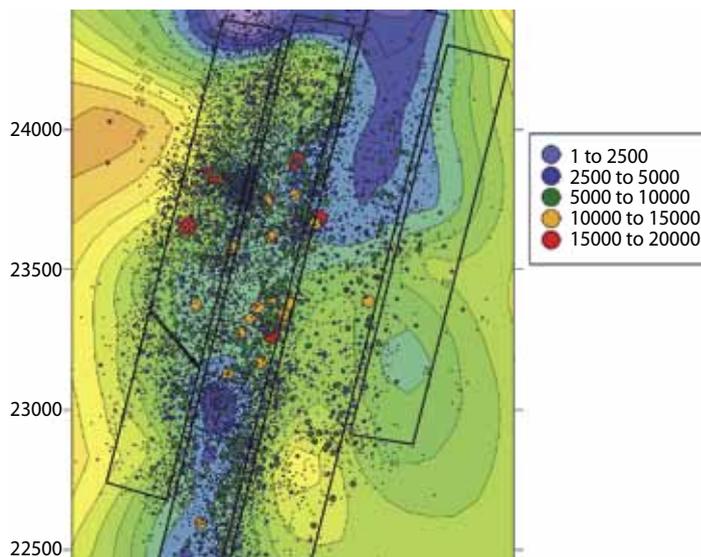


Рис. 7. Сейсмические события и мощность непосредственной кровли

- тивности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // ФТПРПИ. 2016. Т. 52. № 2. С. 233-244.
13. Горная информатика и проблема «больших данных» в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования / И.В. Бычков, Д.Я. Владимиров, В.Н. Опарин и др. // ФТПРПИ. 2016. Т. 52. № 6. С. 1195-1209.

14. Мороз Н.Е., Сидоров Д.В., Соннов М.А. Применение цифровых двойников для прогнозной оценки удароопасности надштрековых целиков // Горная промышленность. 2022. №3. С. 93-98.

Original Paper

UDC 622.831.1 © S.N. Mulev, G.D. Rukavishnikov, D.I. Moroz, V.I. Pashkova, N.E. Moroz, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 12, pp. 88-93
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>

Title

MONITORING OF THE STRESS STATE BY SEISMIC AND NUMERICAL METHODS AT THE MINES OF JSC «VORKUTAUGOL»

Authors

Mulev S.N.¹, Rukavishnikov G.D.^{2,3}, Moroz D.I.⁴, Pashkova V.I.⁴, Moroz N.E.⁵

¹ «VNIMI» JSC, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation

² Geodynamic Monitoring Center of «VNIMI» JSC, St. Petersburg, 199106, Russian Federation

³ Institute of Mining Siberian branch of the RAS, Novosibirsk, 630091, Russian Federation

⁴ «Vorkutaugol» JSC, Vorkuta, 169908, Russian Federation

⁵ St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, 199106, Russian Federation

Authors Information

Mulev S.N., Director of Science, e-mail: mulev@vnimi.ru

Rukavishnikov G.D., Head, Post-graduate student,
 e-mail: geodmiruk@gmail.com

Moroz D.I. Chief Technologist for Gas Dynamic Phenomena –
 Head of the seismic station, e-mail: di.moroz@vorkuta.severstalgroup.com

Pashkova V.I., Geophysicist,
 e-mail: V.I.Pashkova@vorkuta.severstalgroup.com

Moroz N.E., Post-graduate student, e-mail: moroz.nikita.1998@mail.ru

Abstract

The article provides historical information about the development of the seismic monitoring system “GITS” at the mines of JSC «Vorkutaugol», a description of the current modifications of the system and prospects for its further development.

The results of studies of the relationship between seismic activity and geological or technical conditions of mining processes are presented.

The article also presents the results of numerical modeling for predicting high-pressure zones in situation of poor caving of roof.

Keywords

Seismic activity, monitoring of dynamic phenomena, Areas of high rock underground pressure, Speed of longwall coal shearer, Extraction block, Bearing pressure, Immediate roof, Main roof, Numerical simulation.

References

- Lazarevich T.I., Polyakov A.N. & Panin S.F. Investigation of the character of seismic activity of the subsurface in the vicinity of operating coal mines with intensive production regime. Collection of scientific works of VNIMI. St. Petersburg, 2012. (In Russ.)
- Batugin A.S., Shevchuk S.V., Shermatova S.S., Golovko I.V. & Byambasuren Zunduizhamts. Geoecological hazard monitoring in geodynamic interaction of subsoil use objects. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*, 2021, (10-1). pp. 63-73. (In Russ.)
- Abdessattar Lamamra, Neguritsa D.L. & Eremenko V.A. Justification of Longwall Mining Technology for the Development of Kieselguhr Deposit in Sig Mine, Algeria. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 609, 2020, 012002.
- Rui Wang, Jian-biao Bai, Shuai Yan, Yuan-ba Song & Guang-dong Wang. An Improved Numerical Simulation Approach for the Failure of Rock Bolts Subjected to Tensile Load in Deep Roadway. *Geofluids*, 2020, (2), pp. 1-21, Article ID 8888390.
- Gendler S.G., Gabov V.V., Babyr N.V. & Prokhorova E.A. Justification of engineering solutions on reduction of occupational traumatism in

coal longwalls. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*, 2022, (1), pp. 5-19. (In Russ.)

6. Rui Wang, Jian-biao Bai, Shuai Yan, Gui-qiang Pan, Dong Zhang & Qian-cheng Zhu. Structure Partition and Reasonable Width Determination of Waterproof Coal Pillar in Strip Mining. *Lithosphere*, 2021, (Special 3), 3339797.

7. Razumov E.A. Assessment of factors under the most difficult conditions of conducting mining operations on modern coal mines. *Ugol*, 2019, (10), pp. 16-21. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-10-16-21.

8. Vernigor B.M., Shabarov A.N., Krotov N.V. & Arshavsky V.V. Principles of construction and realization of multifunction systems of safety at coal mines for providing control of stress-strain state of rock mass. *Zapiski gornogo instituta*, 2013, (205), p. 141-144. (In Russ.)

9. Meshkov A.A., Popov A.L., Popova Yu.V., Smolin A.V. & Shabarov A.N. Prediction of hazardous phenomena within operating coal seam for the Yalovsky mine field. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*, 2020, (2), pp. 22-33. (In Russ.)

10. Kazanin O.I. & Ilinets A.A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Zapiski gornogo instituta*, 2022, (253), pp. 41-48.

11. Sidorov D.V. & Ponomarenko T.V. Rationale behind the design solutions for enhanced oil recovery with the implementation of «PRESS 3D URAL» software. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017.

12. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V. & Mulev S.N. Laws of spreading and operational evaluation procedure for induced seismicity in mines and in mining areas. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, Vol. 52, № (2), pp. 233-244. (In Russ.)

13. Bychkov I.V., Vladimirov D.Y., Oparin V.N., Potapov V.P. & Shokin Y.I. Mining information science and big data concept for integrated safety monitoring in subsoil management. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2016, Vol. 52, (6), pp. 1195-1209. (In Russ.)

14. Moroz N.E., Sidorov D.V. & Sonnov M.A. Application of digital twins to predict rock-bump hazard of drift pillars. *Gornaya promyshlennost*, 2022, (3), pp. 93-98. (In Russ.)

For citation

Mulev S.N., Rukavishnikov G.D., Moroz D.I., Pashkova V.I. & Moroz N.E. Monitoring of the stress state by seismic and numerical methods at the mines of JSC «Vorkutaugol». *Ugol'*, 2022, (12), pp. 88-93. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-12-88-93.

Paper info

Received November 14, 2022

Reviewed November 21, 2022

Accepted November 25, 2022