



# Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении

Г.Д. Рукавишников<sup>1</sup>✉, С.Н. Мулёв<sup>1</sup>, А.Г. Гаврилов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, Российская Федерация

✉ geodmiruk@gmail.com

**Резюме:** Таштагольское железорудное месторождение в начале 2022 г. было оснащено системой сейсмического мониторинга ГИТС, разработанной АО «ВНИМИ». Система включает в себя подземные сейсмопавильоны, оборудованные трёхкомпонентными датчиками-акселерометрами ДРЦ-11, а также наземную часть с блоком регистрации и компьютером для обработки сигнала. Управление системой, настройка параметров регистрации и обработка результатов производятся с помощью удалённого подключения по сети интернет.

В настоящее время система используется главным образом для локации очагов сейсмических событий, построению зон сейсмической активности и удароопасности. В память компьютера записываются сейсмические события, когда амплитуда колебаний превысила пороговые значения по нескольким датчикам. Записанные события обрабатываются оператором, рассчитываются их координаты и энергия, удаляются помехи. В результате формируется каталог, включающий в себя точное время, координаты и энергию каждого зарегистрированного события. По данным таких каталогов становится возможным строить графики изменения основных параметров сейсмической активности, выявлять пространственные зоны концентрации сейсмических событий и их взаиморасположение с участками ведения горных работ. Контроль удароопасности осуществляется на основе наблюдений за процессом образования и миграции зон сейсмической активности.

Дальнейшим развитием систем сейсмического мониторинга на глубоких шахтах и рудниках могут стать (в дополнение к имеющимся методам контроля) непрерывные наблюдения за показаниями каждого сейсмического датчика во время фоновых колебаний, которые отражают состояние массива горных пород в «этом месте в это время». Предлагается способ обработки длительных непрерывных записей (от суток и более) сейсмического фона, в ходе которого анализу подвергается не сам сигнал, но его спектральные характеристики, а целью становится выявление изменений в спектральном составе непосредственно перед регистрацией сильного сейсмического события.

**Ключевые слова:** геомеханика, шахтная геофизика, сейсмическая активность, горные удары, сейсмический мониторинг, непрерывные наблюдения, фоновые колебания, нелинейная геотомография

**Для цитирования:** Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Гаврилов А.Г. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении. Горная промышленность. 2023;(S1):90–95. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>

## Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit

G.D. Rukavishnikov<sup>1</sup>✉, S.N. Mulev<sup>1</sup>, A.G. Gavrillov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Mining Geomechanics and Mine Surveying (VNIMI) JSC, Saint Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup>EVRAZ West-Siberian Metal Plant (EVRAZ ZSMK) JSC, Novokuznetsk, Russian Federation

✉ geodmiruk@gmail.com

**Abstract:** The Tashtagolsky iron ore deposit was furnished with the GITS seismic monitoring system developed by VNIMI JSC early in 2022. The system includes underground seismic pavilions equipped with three-component DRC-11 accelerometer sensors, as well as the day-light surface part with a recording unit and a computer for signal processing. Control of the system, adjustment of the registration parameters and data processing is made via remote Internet connection.

At present the system is mainly used to locate focal point of seismic events and to plot zones of seismic activity and rock-bump hazards. Seismic events are recorded in the computer memory when the vibration amplitude exceeds the threshold levels on several sensors. The recorded events are processed by the operator, their coordinates and energy are calculated and noise is removed. As the result, a registry is generated that includes the exact time, coordinates and energy of each recorded event. Data from such registries makes it possible to plot changes in the main parameters of seismic activity, identify spatial zones of seismic events concentration and their location in relation to areas of mining operations. The rock-bump hazards is controlled based on observations of formation and migration of the seismic activity zones.



Continuous readings of each seismic sensor during the background vibrations, which reflect the state of the rock mass here and now, could be a further development of seismic monitoring systems in deep ore and mineral mines in addition to the existing monitoring methods. The authors propose a method to process long continuous records (starting from one day or longer) of the seismic noise, during which it is not the signal itself that is analyzed, but its spectral characteristics, and the objective is to detect changes in the spectral composition just before a strong seismic event is registered.

**Keywords:** geomechanics, mine geophysics, seismic activity, rock bursts, seismic monitoring, continuous readings, background vibrations, non-linear geophysical tomography

**For citation:** Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., A. Gavrillov G. Experience of application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagolsky iron ore deposit. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):90–95. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95>

## Введение

При добыче полезных ископаемых на большой глубине возникает проблема горных ударов – внезапных и быстропротекающих разрушений массива горных пород на контуре выработанного пространства [1; 2]. Горные удары происходят в предельно напряжённых частях породного массива, которые были образованы в результате перераспределения напряжений вокруг выработанного пространства. Горные удары нередко приводят к нарушению технологического процесса, повреждению техники, иногда гибели людей.

Для контроля напряжённого состояния массива горных пород на глубоких шахтах и рудниках всего мира активно применяются системы сейсмического мониторинга [3]. Результат работы таких систем используется для определения степени удароопасности массива горных пород [4].

В основе работы этих систем лежит особое свойство массива горных пород – выделение энергии в виде упругих волн (P- и S-волн) из очагов так называемых сейсмических событий [5]. Чем является очаг сейсмического события в том или ином случае (ростом трещины, сдвигом или даже соударением блоков массива) – вопрос открытый и в рамках данной статьи не обсуждается.

Системы мониторинга регистрируют эти волны с помощью датчиков. Типичная запись сейсмического датчика (сейсмограмма) показана на рис. 1.

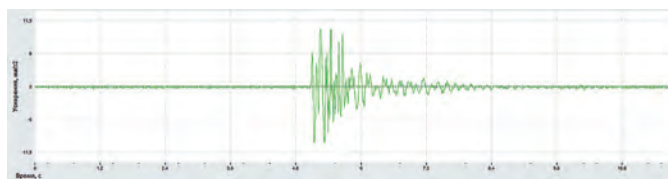


Рис. 1  
Запись датчика –  
сейсмограмма

Fig. 1  
A sensor recording,  
i.e. a seismogram

Такая запись, называемая сейсмограммой, представляет собой график колебаний датчика во времени. В первой части сейсмограммы наблюдается сигнал очень маленькой амплитуды – фоновые колебания. Датчик никогда не пребывает в полном покое. Примерно на пятой секунде наблюдается первое вступление – момент, когда сейсмическая волна впервые «потревожила» датчик. Несколько секунд длятся интенсивные колебания, которые постепенно затухают до уровня фоновых.

Принцип работы всех систем сейсмического мониторинга также одинаков. В горных выработках вокруг добычного участка устанавливается сеть датчиков. Сейсмическая волна, распространяющаяся из очага условно сферически, приходит на датчики в разное время. Зная точные координаты датчиков и точное время первого вступления на каждом из них, можно рассчитать координаты очага. Расчёт координат очага – задача сугубо математическая [6], но на корректности её решения основан весь дальнейший анализ данных. С течением времени формируется каталог сейсмических событий, включающий в себя точное время/дату регистрации события, координаты XYZ и его энергию.

На таких каталогах основан весь дальнейший анализ данных, цель которого – выявление зон активизации сейсмической активности, отнесение тех или иных участков массива к удароопасным, прогнозирование крупных сейсмических событий и т.д. Для решения подобных задач существует множество алгоритмов, учитывающих пространственно-временное распределение сейсмических событий [7].

## Сейсмический мониторинг на Таштагольском железорудном месторождении

Таштагольская шахта обрабатывает запасы железной руды на глубинах порядка 1000 м [8]. Применяемые системы разработки – этажная с обрушением, поэтажно-камерная с закладкой выработанного пространства, поэтажно-камерная с закладкой выработанного пространства с торцовым выпуском руды.

С ростом глубины ведения добычных работ наблюдается рост сейсмической активности [9]. Так, в пределах месторождения ежегодно регистрируются крупные сейсмические события с энергией порядка 1000 000 Дж (для сравнения, энергия сейсмических событий, регистрируемых при подземной добыче угля, лежит в диапазоне 10–10 000 Дж) [10].

К тому же в технологическом цикле применяемых систем обработки еженедельно используются технологические взрывы (ТВ) с весом взрывчатого вещества порядка 10 т, что также способствует росту сейсмической активности.

Вместе с этим Таштагольское месторождение находится в сложной тектонической обстановке. Значения горизонтальных напряжений более чем в 2 раза превышают вертикальные напряжения на актуальной глубине ведения очистных работ [11].

Сейсмические наблюдения на Таштагольском месторождении ведутся с 1986 г. С течением времени регистриру-



ющая аппаратура совершенствовалась, но методы работы и цель наблюдений сохранялись – рассчитать координаты и оценить энергию зарегистрированных сейсмособытий, сформировать каталог.

В 2022 г. на Таштагольском железорудном месторождении была введена в режим промышленной эксплуатации система сейсмического мониторинга ГИТС. Новая система вместе с программным обеспечением является дополнением к прежней системе «Релос», которая в настоящее время также используется на Шерегешевском железорудном месторождении.

Опыт коллектива АО «ВНИМИ» в установке и использовании ГИТС на многих горнодобывающих предприятиях страны (угольные шахты Воркуты и Кузбасса, алмазный рудник Интернациональный) вместе с опытом сотрудников сейсмостанции и участка ППГУ шахты «Таштагольская» в эксплуатации системы «Релос» позволили в течение нескольких месяцев наладить работу новой системы мониторинга.

Система сейсмического мониторинга ГИТС состоит из сети подземных датчиков, кабельных линий, соединяющих датчики с блоком регистрации, сам блок регистрации и компьютер для хранения и обработки данных.

Подземная часть состоит из 15 датчиков ДРЦ-11. Каждый датчик представляет собой трёхкомпонентный акселерометр, позволяющий вести регистрацию колебаний в диапазоне частот 0,5–1000 Гц с возможностью выбирать более узкий диапазон.

Для эксплуатации системы в условиях Таштагольского железорудного месторождения был выбран способ установки датчиков вертикально на бетонных постаментках с ориентировкой по сторонам света. Датчики настроены на регистрацию колебаний в диапазоне 0,5–100 Гц.

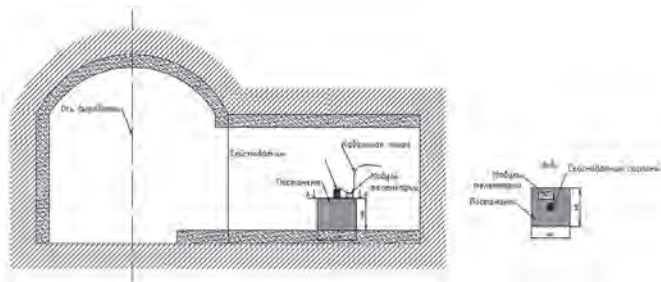


Рис. 2  
Схема установки датчика

Fig. 2  
Sensor installation diagram

Система ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении справляется со всеми стоящими перед сейсмическим мониторингом задачами. Расчёт координат сейсмособытий и оценка их энергии выполняются оперативно, что позволяет проводить ежедневную оценку удароопасности [12].

Программное обеспечение системы позволяет выполнять как расчёт координат сейсмособытий, так и многосторонний анализ каталога сейсмической активности: строить графики изменения основных параметров активности, строить карты удароопасного состояния массива горных пород на основе особенностей распределения событий во времени и пространстве [13].

Пример графической интерпретации результатов сейсмического мониторинга показан на рис. 3.

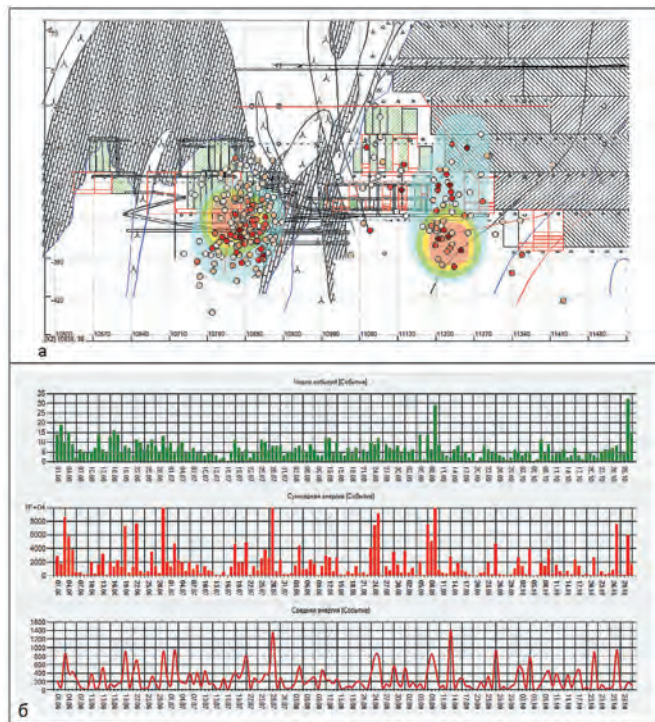


Рис. 3  
Графическая интерпретация результатов

Fig. 3  
Graphical interpretation of the results

### Перспективы применения системы ГИТС

В настоящее время система ГИТС решает стандартный круг задач, стоящих перед сейсмическим мониторингом, однако возможности этой системы далеко не исчерпаны.

Закономерным развитием сейсмических наблюдений становятся непрерывные наблюдения за текущим состоянием отдельного датчика (наподобие датчиков концентрации газа). Появляется необходимость исследования фоновых колебаний. Фоновыми стоит считать все колебания датчика, запись которых не сохраняется в базе данных как сейсмическое событие. Общая длительность всех сохранённых в памяти компьютера за сутки «кусочков» сигнала не превышает 10 мин, то есть менее 1% от всей информации, получаемой с помощью сейсмодатчика.

Одна из трудностей при исследовании длительных записей состоит в том, что на больших временных отрезках визуальный анализ сигнала становится малоприменимым. Пример сейсмической записи трёх датчиков длительностью 24 ч представлен на рис. 4.

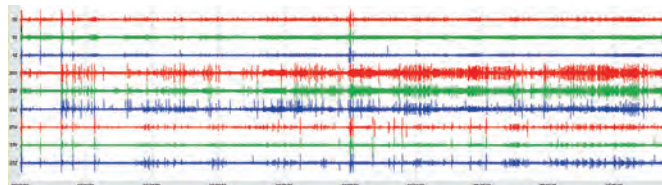


Рис. 4  
Сейсмограммы длительностью 24 ч

Fig. 4  
24 hour-long seismograms

В «классическом» анализе сейсмических данных внимание уделяется коротким временным промежуткам (порядка нескольких секунд), сама запись содержит отчётливый всплеск – сейсмический импульс. На длительных же вре-



менных отрезках сигнал визуально сжимается, сейсмические события, как на рис. 1, становятся слаборазличимы. При видимом сохранении амплитуды колебаний может меняться их частотный состав (спектр).

Возникает задача поиска и выявления закономерностей изменения спектрального состава фоновых колебаний датчика перед произошедшим в его окрестности крупным сейсмическим событием.

Для анализа сейсмических записей длительностью 24 ч было бы удобно рассматривать не сам сигнал, а некую функцию, отражающую изменения в спектре фоновых колебаний – сканирующую функцию  $K$  (рис. 6).

Примером такой функции может выступить следующее соотношение:

$$K = \frac{\sum_{f_1}^{f_2} A^2(f_i)}{\sum_{f_3}^{f_4} A^2(f_i)}$$

где  $A$  – амплитуда частоты  $f_i$  в рассчитанном спектре сигнала;  $K$  – значение сканирующей функции.

Данная функция представляет собой отношение суммарной амплитуды колебаний в диапазоне частот  $f_1 - f_2$  к суммарной амплитуде колебаний в диапазоне частот  $f_3 - f_4$ .

Например, с помощью такой функции можно следить за тем, как меняется доля низкочастотных колебаний в фоновом сигнале.

Для этого суммарную амплитуду низкочастотного диапазона следует относить к суммарной амплитуде всей полосы регистрации колебаний. Это удобно также тем, что значения  $K$  будут изменяться в пределах от 0 до 1.

Для примера применения такого подхода к анализу сейсмической информации, полученной с помощью системы ГИТС на Таштагольском железорудном месторождении была выбрана суточная запись датчика, расположенного наиболее близко к участку ведения очистных работ.

Значения сканирующей функции рассчитывались для текущего сигнала и сохранялись в базе данных вместе с непрерывной записью самих колебаний.

На рис. 5, а изображён сигнал, отражающий текущие показания датчика в течение последних четырёх секунд. На рис. 5, б показан «моментальный» спектр этого сигнала. Красным цветом в спектре выделен диапазон (5–20 Гц), суммарную амплитуду которого будет отслеживать сканирующая функция.

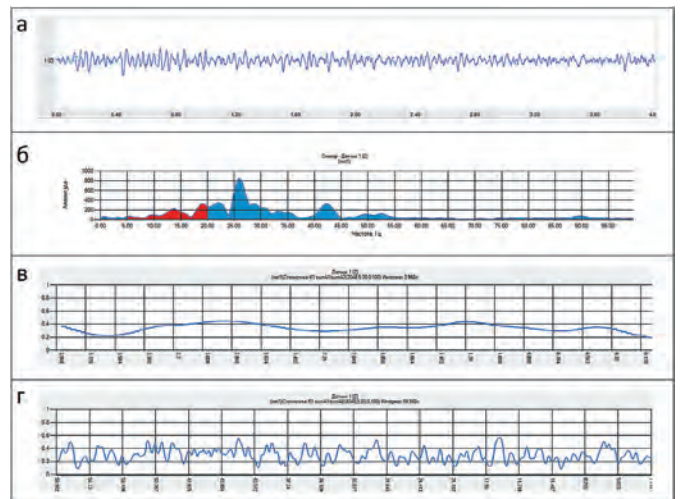
На рис. 5, в, г – графики изменения значений сканирующей функции (параметр  $K$ ) в течение 4 и 60 с соответственно.

Представленные на рис. 5, в, г графики показывают изменение доли низкочастотных колебаний в фоновом сигнале на отрезках 4 с и 60 с. Видно, что значения параметра  $K$  непрерывно изменяются, однако держатся в определённых пределах. Но как будет вести себя исследуемый параметр в течение длительных промежутков времени?

Подобный анализ стал доступен благодаря возможности программного обеспечения системы ГИТС одновременно с регистрацией сейсмических событий выполнять непрерывную запись текущего сигнала и запись результата сканирующей функции в течение суток.

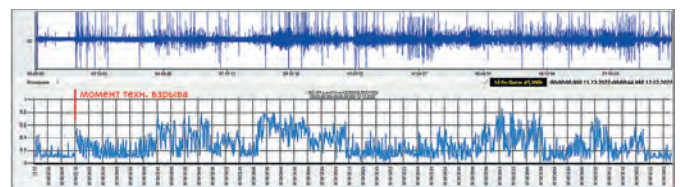
На рис. 6 представлена запись вертикальной компоненты датчика и график изменения параметра  $K$  в течение суток 12 декабря.

День, выбранный для тестирования сканирующей функции, характерен проведением в 01:30 технологического взрыва (с массой ВВ порядка 10 т) на расстоянии около 200 м от датчика.



**Рис. 5**  
Сканирующая функция:  
а – отрезок текущего сигнала вертикальной компоненты колебаний датчика системы ГИТС длительностью 4 с;  
б – спектр колебаний вертикальной компоненты датчика;  
в – график параметра  $K$  за интервал 4 с;  
г – график параметра  $K$  за интервал 60 с

**Fig. 5**  
The scanning function:  
a – a section of the current signal of the vertical oscillation component of the GITS system's sensor with the duration of 4 sec;  
б – the range of the sensor's vertical component oscillations;  
в – a line graph of the  $K$  parameter for a 4-sec interval;  
г – a line graph of the  $K$  parameter for a 60-sec interval



**Рис. 6**  
Суточные записи колебаний и график суточных колебаний параметра  $K$  за 12.12.2022

**Fig. 6**  
Daily records of oscillations and a line graph of daily oscillations of the  $K$  parameter on 12.12.2022

В течение часа до момента технологического взрыва горные работы в шахте приостанавливаются. После взрыва в течение 3 ч происходит проветривание, затем горные работы возобновляются.

Образовавшийся период «затишья» можно использовать для наблюдений за сотрясанием породного массива без механических помех от различного шахтного оборудования.

Отсутствие вибраций от работающей возле датчика техники позволяет отметить фоновый уровень амплитуды низкочастотных колебаний. Перед взрывом значение параметра  $K$  составляло порядка 0,1 усл. ед.

Момент взрыва отражён в поведении графика сканирующей функции скачкообразным ростом значений. Далее в течение суток график исследуемого параметра демонстрирует несколько длительных периодов повышенных значений, нарастающих более плавно. Причиной роста низкочастотной составляющей фоновых колебаний в этих случаях являются, скорее всего, механические шумы от работы вибрационных доставочно-погрузочных устройств или движения рельсового транспорта (подробная информация о составе работ около датчика в рассматриваемый день отсутствует).



Стоит отметить также, что минимальные значения  $K$ , многократно достигаемые в течение суток, оказываются на одном уровне, и этот уровень соответствует значению  $K$  в тихий период перед взрывом. То есть в колебаниях датчика всегда присутствует некий «фон тишины».

## Заключение

В статье описан опыт применения сканирующей функции для одного частотного диапазона. Это обусловлено как текущими возможностями программного обеспечения, так и вычислительными возможностями компьютера, выполняющего непрерывную запись в базу данных.

Представленный способ анализа сейсмических данных пока что не имеет строгой методики. На данном этапе происходит процесс настройки инструмента измерений.

Требуется проведение экспериментов с использованием других сканирующих функций или же наборов функций, которые будут давать наиболее полную информацию для интерпретации.

Предстоит составить каталог спектральных портретов технологических шумов, возникающих при ведении горных работ (рельсовый транспорт, самоходные машины, вибрационные установки, электрическое оборудование, насосные станции, взрывные работы малой мощности)

для выявления их сначала в суточных записях, а потом и в текущем сигнале.

Совершенствование возможностей хранения сейсмической информации, применение современных компьютеров с высокой производительностью, вместе с модернизацией самой системы мониторинга, должны помочь в моментальной обработке текущих данных о колебаниях сейсмического датчика.

«Аккуратная» установка регистрирующей аппаратуры в подземных условиях, поиск новых методов соединения датчика с массивом повысят качество и достоверность получаемой информации.

Установка сейсмических датчиков для непрерывной записи желательна непосредственно в области влияния очистных или проходческих работ: в краевых частях массива горных пород, наиболее нагруженных из-за перераспределения напряжений в процессе образования пустот в массиве, в целиках, имеющих предпосылки к разрушению в динамической форме.

Дальнейшее развитие описанного способа сейсмических наблюдений позволит получать данные, пригодные для использования в рамках теории нелинейной геотомографии [13–15].

## Список литературы

1. Петухов И.М., Линьков А.М. *Механика горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 279 с.
2. Козырев А.А., Семенова И.Э., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Факторы изменения сейсмического режима и локализации опасных зон при крупномасштабном техногенном воздействии. *Горная промышленность*. 2022;(6):95–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
3. Mendecki A.J., Lynch R.A., Malovichko D.A. Routine micro-seismic monitoring in mines. In: *Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference, Perth, Western Australia, November, 2010*, pp. 1–33. Available at: <https://aees.org.au/wp-content/uploads/2013/11/56-RichardLynch.pdf>
4. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*. 2019;(9):68–72. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>
5. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе. *Физическая мезомеханика*. 2009;12(1):37–43.
6. Zhu W., Beroza G.C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*. 2019;216(1):261–273. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy423>
7. Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J.-Q., Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;80:232–245. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.029>
8. Штирц В.А., Колтышев В.Н. Отработка блоков и распределение толчков после массовых взрывов в условиях Таштагольского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(7):54–59. Режим доступа: [https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/54\\_59.pdf?ysclid=ler4hcb7gk809365279](https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/54_59.pdf?ysclid=ler4hcb7gk809365279)
9. Фрейдин А.М., Неверов С.А., Неверов А.А. Исходное поле напряжений в массивах горных пород и его изменение с ростом глубины залегания. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2014;1(1):328–336.
10. Мулев С.Н., Рукавишников Г.Д., Мороз Д.И., Пашкова В.И., Мороз Н.Е. Мониторинг напряженного состояния сейсмическими и расчетными методами на шахтах АО «Воркутауголь». *Уголь*. 2022;(12):88–93. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>
11. Неверов С.А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния. Часть II: Тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012;(3):25–34.
12. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2022;(1):12–22. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220102>
13. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Усольцева О.М., Мулев С.Н., Юшкин В.Ф. и др. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. I: Формулировка и обоснование задачи исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):5–25. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
14. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. II: Динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоэмиссионные процессы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(11):5–26. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
15. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Ч. III: Перспективные системы контроля деформационно-волновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(12):5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>



## References

- Petukhov I.M., Linkov A.M. *Mechanics of rock bursts and bumps*. Moscow: Nedra; 19(In Russ.) 83. 279 p.
- Kozyrev A.A., Semenova I.E., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Factors of seismic behavior change and localization of hazardous zones under a large-scale mining-induced impact. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):95–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-95-102>
- Mendecki A.J., Lynch R.A., Malovichko D.A. Routine micro-seismic monitoring in mines. In: *Australian Earthquake Engineering Society 2010 Conference, Perth, Western Australia, November, 2010*, pp. 1–33. Available at: <https://aees.org.au/wp-content/uploads/2013/11/56-RichardLynch.pdf>
- Mulev S.N., Pital M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G. Advanced seismic monitoring technologies for coal and ore mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(9):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.09.08>
- Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Fateev A.V., Semin A.Yu. Seismic activation at coal mining in Kuzbass. *Physical Mesomechanics Journal*. 2009;12(1):37–43. (In Russ.)
- Zhu W., Beroza G.C. PhaseNet: a deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. *Geophysical Journal International*. 2019;216(1):261–273. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy423>
- Cai W., Dou L., Zhang M., Cao W., Shi J.-Q., Feng L. A fuzzy comprehensive evaluation methodology for rock burst forecasting using microseismic monitoring. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018;80:232–245. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.029>
- Shtirts V.A., Koltyshev V.N. Development blocks and the distribution of aftershocks after mas-sive explosions in the conditions of the Tashtagol deposit. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(7):54–59. (In Russ.) Available at: [https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/54\\_59.pdf?ysclid=ler4hcb7gk809365279](https://giab-online.ru/files/Data/2015/07/54_59.pdf?ysclid=ler4hcb7gk809365279)
- Freidin A.M., Neverov A.A., Neverov S.A. Initial stress field of rock masses and its change with depth. *Fundamental and Applied Issues of Mining*. 2014;1(1):328–336. (In Russ.)
- 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):88–93. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-12-88-93>
- Neverov S.A. Types of orebodies on the basis of the occurrence depth and stress state. Part II: Orebody tectonotypes and geomedium models. *Journal of Mining Science*. 2012;48(3):421–428. <https://doi.org/10.1134/S1062739148030033>
- Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A. Microseismic monitoring of geodynamic phenomena in rockburst-hazardous mining conditions. *Fiziko-texhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022;(1):12–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20220102>
- Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Usoltseva O.M., Mulev S.N., Yushkin V.F. et al. AN Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part I: Research problem statement and justification. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):5–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-01-0-5-25>
- Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear geotomography. Part II: Dynamic and kinematic characteristics of pendulum waves in high-stress geomedium and processes of seismic emission. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(11):5–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-0-5-26>
- Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. Experimental and theoretical framework of nonlinear tomography. Part III: Promising systems to control deformation and wave processes in surface and underground mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(12):5–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-05-29>

### Информация об авторах

**Рукавишников Георгий Дмитриевич** – аспирант Институт горного дела СО РАН, заведующий центром геодинамического мониторинга, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: geodmiruk@gmail.com

**Мулёв Сергей Николаевич** – директор по науке, АО «ВНИМИ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: mulev@vnimi.ru

**Гаврилов Алексей Григорьевич** – главный инженер филиала-сегмента «Горнорудные активы», АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк, Российская Федерация; e-mail: aleksey.gavrilov@evraz.com

### Information about the authors

**Georgy D. Rukavishnikov** – Post-graduate student, Institute of Mining of the Siberian Branch of RAS, Head of the Geodynamic Monitoring Centre, VNIMI JSC, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: geodmiruk@gmail.com

**Sergey N. Mulev** – R&D Director, VNIMI JSC, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: mulev@vnimi.ru

**Aleksey G. Gavrilov** – Chief Engineer, 'Gornorudnye Aktivy' Segment Branch, EVRAZ ZSMK JSC, Novokuznetsk, Russian Federation; e-mail: aleksey.gavrilov@evraz.com

### Article info

Received: 17.02.2023

Revised: 01.03.2023

Accepted: 03.03.2023

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 17.02.2023

Поступила после рецензирования: 01.03.2023

Принята к публикации: 03.03.2023