

## УДК 622.831:550.34.03

## Рукавишников Георгий Дмитриевич

инженер, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, г. Новосибирск, Красный проспект, 54; АО «ВНИМИ», 199106, г. Санкт-Петербург, 22-я линия ВО, корпус 1, лит. М. e-mail: <u>geodmiruk@gmail.com</u>

## Киряева Татьяна Анатольевна

доктор технических наук, зав. отдела экспериментальной геомеханики, Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН e-mail: <u>coalmetan@mail.ru</u>

## ОСОБЕННОСТИ ФОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДАТЧИКА В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ И РУДНИКОВ\*

#### Аннотация:

В статье приводится анализ непрерывной суточной записи одного из датчиков системы «GITS» в день регистрации крупнейшего за 2024 г. сейсмического толчка и последовавшей за ним серии крупных толчков на Таштагольском железорудном месторождении. Предложен новый метод обработки данных суточных непрерывных записей. Представлен анализ энергетических показателей колебаний сейсмического датчика – трехкомпонентного акселерометра. Описаны особенности распределения энергии колебаний между компонентами датчика. Обнаружена связь энергетических показателей фоновых колебаний с интенсивностью сейсмической активности массива горных пород.

Ключевые слова: сейсмическая активность, горные удары, сейсмические датчики, непрерывная запись колебаний, полная энергия колебаний, сейсмический датчик, блочное строение массива, подземная разработка месторождений.

## DOI: 10.25635/2313-1586.2025.02.108

### Rukavishnikov Georgy D.

Engineer, N.A. Chinakal Mining Institute, Siberian Branch of RAS, 630091, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt; JSC "VNIMI", 199106 St. Petersburg, 22nd line V.O., building 1, lit. M. e-mail: <u>geodmiruk@gmail.com</u>

## Kiryaeva Tatyana A.

Doctor of Engineering Sciences, Head of the Department of Experimental Geomechanics, N.A. Chinakal Mining Institute, Siberian Branch of RAS, e-mail: <u>coalmetan@mail.ru</u>

### FEATURES OF BACKDROUND OSCILLATIONS OF SEISMIC SENSOR IN DEEP MINE CONDITIONS

#### Abstract:

This article provides an analysis of the daily continuous recording of one of the sensors of the GITS system during the day of registration the largest seismic event for 2024 and the series of large aftershocks at the Tashtagol iron deposit. A new method of processing data of continuous records is proposed. An analysis of the energy characteristics of the oscillations of the seismic sensor (threecomponent accelerometer) is presented. The features of the distribution of oscillation energy between the sensor's components are described. The connection between the energy characteristics of basic oscillations and the rock mass seismic activity level was found.

Key words: seismic activity, rock blast, basic oscillations, continuous recording of fluctuations, full energy of oscillations, seismic sensors, blocky rock mass, stress-strain state, underground mining.

# Введение

Прогноз горных ударов и внезапных выбросов угля и газа при ведении горных работ на угольных шахтах – одна из ключевых задач при обеспечении промышленной безопасности угледобывающих предприятий [1].

В настоящее время сейсмические наблюдения в процессе отработки твердых полезных ископаемых на большой глубине стали одним из обязательных инструментов оценки уровня напряженно-деформированного состояния массива горных пород, нарушенного горными работами [2, 3]. Региональный прогноз удароопасности угольного месторождения в пределах шахтного поля ведется не только по данным, полученным

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках проекта НИР (номер гос. регистрации 124020700085-5

при ведении геологоразведочных работ, но и по данным сейсмоакустических наблюдений (с помощью систем сейсмического мониторинга). При этом большую роль играет накопление статистики сейсмоэнерговыделения с привязкой гипоцентров сейсмических событий к шахтному полю [4].

Однако в ряде случаев динамические явления в угольных шахтах происходят в период «затишья» в местах временного отсутствия сейсмической активности. В таких случаях информацию о механическом состоянии массива горных пород могут дать непрерывные записи фоновых колебаний сейсмических датчиков [5, 6].

В статье предложен новый инструмент анализа длительных записей, главным источником полезной информации которого являются «фоновые колебания». В распоряжении авторов имелись непрерывные записи пяти датчиков системы сейсмического мониторинга «GITS» (разработана и произведена в АО» ВНИМИ») за период с 01.06.2024 по 01.12.2024.

В статьях [5, 6] описан процесс организации непрерывных наблюдений и получения данных, а также анализ суточных записей с помощью специальной «сканирующей» функции, отслеживающей долю суммарной амплитуды колебаний выделенного частотного диапазона в полном спектре.

Авторы данной статьи применили новый метод для анализа непрерывных суточных записей с использованием полной энергии колебаний, которая представляет собой суммирование энергий компонент X, Y, Z сейсмического датчика. Энергия колебаний каждой компоненты рассчитывалась каждые 2 сек как площадь под графиком энергетического спектра для всего частотного диапазона для отрывка записи длительностью 4 сек.

## Обработка данных

Непрерывная суточная запись с сохранением данных в память регистрирующего компьютера организована сотрудниками АО «ВНИМИ» (г. Санкт-Петербург) в 2024 г. для нескольких сейсмических датчиков, распределенных по шахтному полю Ташта-гольского железорудного месторождения.

Датчик системы «GITS» представляет собой трехкомпонентный акселерометр, позволяющий вести регистрацию колебаний в диапазоне частот 0,5 – 1000 Гц с возможностью выбирать более узкий диапазон [7]. Частота дискретизации регистрируемого сигнала составляет 2 кГц. Частота сохраняемого в память компьютера сигнала в режиме непрерывной записи – 500 Гц.

В условиях Таштагольского железорудного месторождения датчики системы установлены в специальных нишах на бетонных постаментах (рис. 1), сориентированы по сторонам света – компонента X на восток, Y на север, Z – вертикально вверх.



Рис. 1. Схема установки датчика

Для демонстрации изменения полной энергии в течение суток приводится запись датчика № 25 системы сейсмического мониторинга «GITS», установленной на Таштагольской железорудной шахте.

Выбранный для анализа сейсмодатчик № 25 расположен наиболее близко к участкам ведения добычных работ и фактически находится в зоне перераспределения горного давления от образованных пустот породного массива [7].

24 июля 2024 г. в 13:47:42 (UTC±0:00) на Таштагольском железорудном месторождении был зарегистрирован крупнейший за последние несколько лет сейсмический толчок, энергия которого превысила 1 ГДж. Сразу за толчком последовало резкое увеличение сейсмической активности.

На рис. 2 показан участок шахтного поля Таштагольского железорудного месторождения с отметками сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024 и отметкой расположения датчика № 25.



🛕 – датчик с непрерывной записью сигнала

Все крупные толчки (красные и желтые кружки) и большая часть мелких событий произошли во второй половине суток, после регистрации крупнейшего толчка с энергией порядка 1 ГДж.

Для представления о характере сейсмической активности в течение суток, до и после крупнейшего толчка, приводится график энергии всех сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024 (рис. 3).

В начале суток, в 0:30, был произведен технологический взрыв, после которого последовал короткий всплеск сейсмической активности в низкоэнергетическом диапазоне. Далее, в первой половине суток, наблюдается средняя интенсивность сейсмической активности. Отчетливо виден резкий всплеск сейсмической активности после сейсмического толчка с энергией 1ГДж в 13:47:42. Таким образом, выбранные сутки характеризуются наличием как периода «затишья», так и периода аномально высокой активности и представляют интерес для анализа непрерывной записи.

Рис. 2. Карта гипоцентров сейсмических событий в окрестности датчика № 25 системы «GITS» на Таштагольском железорудном месторождении



Рис. 3. График энергии сейсмических событий, зарегистрированных системой «GITS» 24.07.2024

На рис. 4 представлены суточные сейсмограммы сейсмического датчика № 25, расположенного в зоне повышенной сейсмической активности шахтного поля Ташта-гольского железорудного месторождения.



Рис. 4. Сейсмограммы непрерывной суточной записи датчика № 25

Сейсмический толчок с энергией 1ГДж в 13:47:42 и последующий за ним всплеск активности отчетливо видны на сейсмограммах. Для всех трех компонент датчика 25 были рассчитаны графики полной энергии колебаний (рис. 5).





112

Суточные графики полной энергии колебаний для компонент XYZ датчика № 25 показывают существование «фонового» уровня энергии. Этот уровень хорошо прослеживается на графике с логарифмическим масштабом вертикальной шкалы (см. рис. 5) в начале суток (с 0:00 до 2:00 UTC±0:00) и в середине суток (с 12:00 до 14:00 UTC±0:00). В это время происходит перерыв между рабочими сменами, интенсивность горных работ снижается, что позволяет отметить фоновый уровень энергии колебаний датчика.

Из рис. 5 видно, что графики для каждой из трех компонент датчика неодинаковы. График компоненты X показывает следующее.

«Фоновый» уровень энергии колебаний датчика в начале суток, в промежутке 0:00 - 3:00, составил порядка  $5\cdot10^5$  усл. ед. Технологический взрыв в 0:30 отражен в графике резким скачком до значений  $1\cdot10^9$ , но продолжительность повышенных значений невелика, и график возвращается к фоновому уровню.

В первой половине суток рост полной энергии колебаний обусловлен интенсивными горными работами в окрестности датчика. Между рабочими сменами (с 12:00 до 14:00 UTC±0:00) уровень полной энергии падает до значений заметно ниже фоновых, до  $1\cdot10^5$ . Однако вторая рабочая смена в этот день не смогла приступить к работе: в 13:47:42 крупнейший сейсмический толчок привел к массовым деформациям выработок и остановке рабочего процесса. Все подземные рабочие были выведены на поверхность. В любой спокойный сейсмический день при остановке работ уровень полной энергии остался бы на фоновых значениях. Но произошедший удар резко поднял уровень полной энергии колебаний до максимальных значений за сутки –  $2\cdot10^9$  усл. ед. Примечательно, что после удара и до 16:30 значения графика постепенно снижаются, но не падают ниже  $1\cdot10^7$  усл. ед. Следующий по энергии крупный толчок в 16:34 опять поднимает уровень полной энергии, который впоследствии уже не падает ниже значений в  $5\cdot10^7$  усл. ед.

Таким образом, мы наблюдаем изменение «фонового» значения полной энергии колебаний датчика после каждого особо крупного толчка, произошедшего в окрестности датчика. Это обстоятельство вносит существенные коррективы в представления о механике породных массивов, в особенности о колебательных процессах в породных массивах блочного строения [8 – 10].

Группы упругих волн от сейсмических событий и технологических взрывов средней и низкой силы, проходящие через датчик, приводят к резкому росту полной энергии колебаний, однако после затухания группы упругих волн, когда датчик возвращается в состояние фоновых колебаний, полная энергия колебаний также падает до уровня фоновых значений. Но крупнейший сейсмический толчок, горный удар, произошедший в окрестности датчика, привел к изменению уровня фоновых колебаний более чем на два порядка вверх.

Данные наблюдения вынуждают задаться вопросом, от чего зависит полная энергия колебаний датчика и в особенности ее «фоновый» уровень.

Представленные графики имеет смысл рассматривать как по отдельности для каждой компоненты, так и в сумме для всего датчика (рис. 6).

Суммарный график принимает смысл «геомеханической температуры» для участка массива горных пород, в котором установлен датчик. Графики для каждой из компонент будут характеризовать анизотропию волнового поля в области датчика, а с позиций механики блочной среды – различие в степени «зажатости» блока породного массива, в котором установлен датчик [11].

Не менее интересную информацию о колебательном состоянии породного массива показывают графики процентного отношения энергии колебаний каждой компоненты от суммарной полной энергии колебаний датчика.





Подобные графики для суточной записи датчика № 25 24.07.2024 представлены на рис. 7 и в логарифмическом масштабе вертикальной шкалы на рис. 8.



Рис. 7. Графики процентного отношения энергии колебаний каждой из компонент XYZ от полной энергии колебаний всего датчика



Рис. 8. Графики процентного отношения энергии колебаний каждой из компонент XYZ от полной энергии колебаний всего датчика (в логарифмическом масштабе по вертикальной оси)

Полученные графики позволяют проследить смещение энергии колебаний между направлениями XYZ. Появление крупных сейсмических событий вблизи выбранного датчика сопровождается изменением распределения энергии колебаний между компонентами датчика.

Представление массива горных пород в виде блочной среды с многоуровневой иерархической структурой позволяет интерпретировать переход энергии колебаний между компонентами одного датчика как появление новых степеней свободы (и в новых направлениях) блока породного массива, в котором установлен датчик [12]. Также возможна связь обнаруженных эффектов с изменением направления действия главных напряжений в массиве горных пород.

## Выводы

Таким образом, отслеживание фоновых колебаний сейсмических датчиков может стать инструментом прогноза горных ударов и внезапных выбросов угля и газа при ведении горных работ на больших глубинах. Авторами предложен новый метод получения и обработки качественно нового типа данных о колебательных процессах, протекающих в породном массиве в процессе ведения горных работ на большой глубине. Рассмотрена непрерывная суточная запись датчика, в непосредственной близости от которого произошел крупнейший за год сейсмический толчок с энергией порядка 1 ГДж. Последовавший за этим рост сейсмической активности нашел отражение в энергетических характеристиках суточной записи датчика.

Получены суточные графики изменения полной энергии колебаний для каждой из компонент сейсмического датчика. Введено понятие «фонового уровня полной энергии колебаний». Установлено, что фоновый уровень полной энергии колебаний сейсмического датчика непостоянен и может изменяться в течение суток, в том числе скачкообразно после появления крупных сейсмических событий вблизи датчика. За два часа до регистрации толчка с энергией 1 ГДж фоновый уровень полной энергии падает до минимальных значений.

Вместе с этим обнаружено, что распределение полной энергии колебаний датчика по трем компонентам неравномерно. На это распределение также влияют крупные сейсмические события вблизи датчика.

Предложенный метод анализа сейсмической информации может иметь развитие для установления связи суточных показателей энергии колебаний датчика с газодинамическими явлениями в угольных шахтах и рудниках [13, 14].

# Список литературы

1. Еременко А.А., Еременко В.А., Лобанова Т.В., 2023. Указания по безопасному ведению горных работ на Таштагольском месторождении, опасном по горным ударам. Новосибирск-Новокузнецк, 76 с.

2. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н., 2016. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 2, С. 34-47.

3. Мулев С.Н., Питаль М.Н., Панин С.Ф., Тюхрин В.Г., 2019. Современные технологии сейсмического мониторинга угольных шахт и рудников. *Горный журнал*, Т. 2019, №. 9, С. 68-72.

4. Еременко А.А., Мулев С.Н., Штирц В.А., 2022. Мониторинг геодинамических явлений микросейсмическим методом при освоении удароопасных месторождений. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 1, С. 12–22.

5. Рукавишников Г.Д., Мулев С.Н., Гаврилов А.Г., 2023. Опыт применения и перспективы развития системы сейсмического мониторинга GITS на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*, №S1, С. 90-95. https://doi.org/ 10.30686/1609-9192-2023-S1-90-95

6. Гаврилов А.Г., Штирц В.А., Рукавишников Г.Д., 2024. Современные подходы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород по данным сейсмических наблюдений на Таштагольском железорудном месторождении. *Горная промышленность*, № S3, C. 32-36. DOI 10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36

7. Штирц В.А., Колтышев В.Н., 2015. Отработка блоков и распределение толчков после массовых взрывов в условиях Таштагольского месторождения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 54-59.

8. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А., 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии.

Часть I: формулировка и обоснование задачи исследований. Горный информационноаналитический бюллетень, № 1, С. 5-25.

9. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А. 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть II: динамико-кинематические характеристики волн маятникового типа в напряженных геосредах и сейсмоэмиссионные процессы. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 11, С. 5-26.

10. Опарин В.Н., Адушкин В.В., Востриков В.И., Юшкин В.Ф., Киряева Т.А., 2019. Развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геотомографии. Часть III: перспективные системы контроля деформационноволновых процессов в подземных и наземных условиях ведения горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 5-29.

11. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.И., 1997. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 1, С. 3-16.

12. Адушкин В.В., Опарин В.Н., 2014. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. Ш. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, № 4, С. 10-38.

13. Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A. et al., 2018. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass. *J. of Mining Sci.*, Vol. 54, No. 1, P. 3 - 14.

14. Киряева Т.А., Рукавишников Г.Д., 2021. О влиянии землетрясений и мощных технологических взрывов на газодинамическую активность угольных шахт. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, № 2, С. 385-395.

## References

1. Eremenko A.A., Eremenko V.A., Lobanova T.V., 2023. Ukazaniya po bezopasnomu vedeniyu gornykh rabot na Tashtagol'skom mestorozhdenii, opasnom po gornym udaram [Guidelines for the safe conduct of mining operations at the Tashtagol deposit, dangerous for rock bursts]. Novosibirsk-Novokuznetsk, 76 p.

2. Yakovlev D.V., Tsirel' S.V., Mulev S.N., 2016. Zakonomernosti razvitiya i metodika operativnoi otsenki tekhnogennoi seismicheskoi aktivnosti na gornykh predpriyatiyakh i v gornodobyvayushchikh regionakh [Patterns of development and methods of operational assessment of man-made seismic activity at mining enterprises and in mining regions]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, №. 2, P. 34-47.

3. Mulev S.N., Pital' M.N., Panin S.F., Tyukhrin V.G., 2019. Sovremennye tekhnologii seismicheskogo monitoringa ugol'nykh shakht i rudnikov [Modern technologies for seismic monitoring of coal mines and pits]. Gornyi zhurnal, Vol. 2019, №. 9, P. 68-72.

4. Eremenko A.A., Mulev S.N., Shtirts V.A., 2022. Monitoring geodinamicheskikh yavlenii mikroseismicheskim metodom pri osvoenii udaroopasnykh mestorozhdenii [Monitoring of geodynamic phenomena by the microseismic method in the development of rock burst-hazardous deposits]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, N = 1, P. 12–22.

5. Rukavishnikov G.D., Mulev S.N., Gavrilov A.G., 2023. Opyt primeneniya i perspektivy razvitiya sistemy seismicheskogo monitoringa GITS na Tashtagol'skom zhelezorudnom mestorozhdenii [Experience in the application and prospects for the development of the GITS seismic monitoring system at the Tashtagol iron ore deposit]. Gornaya promyshlennost', № S1, P. 90–95. https://doi.org/10.30686/ 1609-9192-2023-S1-90-95

6. Gavrilov A.G., Shtirts V.A., Rukavishnikov G.D., 2024. Sovremennye podkhody kontrolya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornykh porod po dannym seismicheskikh nablyudenii na Tashtagol'skom zhelezorudnom mestorozhdenii [Modern ap-

proaches to monitoring the stress-strain state of rock mass based on seismic observations at the Tashtagol iron ore deposit]. Gornaya promyshlennost', N S3, P. 32-36. DOI

10.30686/1609-9192-2024-3S-32-36 7. Shtirts V.A., Koltyshev V.N., 2015. Otrabotka blokov i raspredelenie tolchkov posle massovykh vzryvov v usloviyakh Tashtagol'skogo mestorozhdeniya [Block mining and shock distribution after mass blasts at the Tashtagol deposit]. Gornyi informatsionnoanaliticheskii byulleten', № 7, P. 54-59.

8. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A., 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part I: formulation and justification of the research problem]. Chast' I: formulirovka i obosnovanie zadachi issledovanii. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 1, P. 5-25.

9. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Yushkin V.F., Kiryaeva T.A. 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii. Chast' II: dinamiko-kinematicheskie kharakteristiki voln mayatnikovogo tipa v napryazhennykh geosredakh i seismoemissionnye protsessy [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part II: dynamic and kinematic characteristics of pendulum-type waves in stressed geomedia and seismic emission processes]. Gornyi informatsionnoanaliticheskii biulleten', № 11, P. 5-26.

10. Oparin V.N., Adushkin V.V., Vostrikov V.I., Iushkin V.F., Kiryaeva T.A., 2019. Razvitie eksperimental'no-teoreticheskikh osnov nelineinoi geotomografii. Chast' III: perspektivnye sistemy kontrolya deformatsionnovolnovykh protsessov v podzemnykh i nazemnykh usloviyakh vedeniya gornykh rabot [Development of experimental and theoretical foundations of nonlinear geo-tomography. Part III: promising systems for monitoring deformation-wave processes in underground and surface mining conditions]. Gornyi informatsion-no-analiticheskii biulleten', № 12, P. 5-29.

11. Kurlenya M.V., Oparin V.N., Vostrikov V.I., 1997. Ob effekte anomal'no nizkogo treniya v blochnykh sredakh [On the effect of abnormally low friction in block media]. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh, № 1, P. 3-16.

12. Adushkin V.V., Oparin V.N., 2014. Ot yavleniya znakoperemennoi reaktsii gornykh porod na dinamicheskie vozdeistviya – k volnam mayatnikovogo tipa v napryazhennykh geosredakh [From the phenomenon of alternating response of rocks on dynamic impacts to pendulum-type waves in stressed geo-environments]. Ch. III. Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopa-emykh,  $N_{2}$  4, P. 10-38.

13. Oparin V.N., Adushkin V.V., Kiryaeva T.A. et al., 2018. Effect of Pendulum Waves from Earthquakes on Gas-Dynamic Behavior of Coal Seams in Kuzbass. *J. of Mining Sci.*, Vol. 54, No. 1, P. 3 - 14.

14. Kiryaeva T.A., Rukavishnikov G.D., 2021. O vliyanii zemletryasenii i moshchnykh tekhnologicheskikh vzryvov na gazodinamicheskuiu aktivnost' ugol'nykh shakht [About the influence of earthquakes and powerful technological explosions on the gas-dynamic activity of coal mines]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle,  $N_{2}$  2, P. 385-395.