ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):155-165
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 550.34.038 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_155

СИСТЕМА МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИБОРТОВОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ В ГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ ЗА КОНЕЧНЫМ КОНТУРОМ КАРЬЕРА

А.А. Козырев[1], М.М. Каган[1], Д.С. Чернобров[1], И.Г. Панасенко[1]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: d.chernobrov@ksc.ru

Аннотация: Рассмотрены особенности проектирования и реализации сети сейсмического мониторинга за состоянием уступов рудного карьера на основе глубоких наклонных скважин с устьями, вынесенными за пределы его конечного контура. В исследовании использовались данные полученные системой микросейсмического мониторинга рудника «Железный» Ковдорского ГОКа (Мурманская область, Россия). Практика эксплуатация системы показала, что вследствие проводимых в карьере горных работ, срок эксплуатации скважин с сейсмическими датчиками на бортах карьера ограничен. Была поставлена задача разработки конфигурации системы мониторинга, позволяющей обеспечить длительный срок жизни сейсмической сети, не зависящей от проводимых на борту карьера работ. Проанализировано влияние конфигурации сети мониторинга на качество получаемых данных. Изложен и обобщен опыт практической реализации такой системы на действующем горнорудном предприятии. Рассчитаны метрологические характеристики системы мониторинга. Показано, что описанная конфигурация сейсмической сети может обеспечить контроль всего прибортового массива рудника «Железный», за исключением верхних горизонтов юго-западного бортов карьера. Данные, полученные при работе с системой, позволили установить зависимости, связывающие динамику микросейсмической активности в прибортовом массиве пород и развитие деформационных процессов. По результатам работ создана система микросейсмического мониторинга, способная обеспечить устойчивую длительную регистрацию естественной сейсмичности прибортового массива карьера и выявление зон активного трещинообразования. Данный материал представляет интерес для специалистов, занимающихся геофизическим контролем состояния геологических сред при техногенных воздействиях и геомеханикой открытых горных работ.

Ключевые слова: открытые горные работы, борт карьера, массив пород, мониторинг, сейсмический метод, сейсмические датчики, сейсмическая сеть, метрологические характеристики.

Для цитирования: *Козырев А. А., Каган М. М., Чернобров Д. С., Панасенко И. Г.* Система микросейсмического мониторинга прибортового массива на основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 155–165. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_155.

© А.А. Козырев, М.М. Каган, Д.С. Чернобров, И.Г. Панасенко. 2022.

Microseismic monitoring system of the pit's board array based on seismic sensors in deep boreholes beyond the final pit contour

A.A. Kozyrev[1], M.M. Kagan[1], D.S. Chernobrov[1], I.G. Panasenko[1]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: d.chernobrov@ksc.ru

Abstract: The features of the design and implementation of a seismic monitoring system for the state of the board of an open pit based on deep inclined boreholes with mouths outside the final pit contour are considered. The study used data obtained by the microseismic monitoring system of the Zhelezny mine of the Kovdorsky GOK (Murmansk region, Russia). The practice operating the system has shown that, due to the mining operations carried out in the career, the service life of boreholes with seismic sensors on the board of the career is limited. The task was to develop a configuration of the monitoring system that would ensure a long life of the seismic network, independent of the work carried out on board the open pit. The article analyzes the influence of the monitoring network configuration on the quality of the data received. The experience of practical implementation of such a system at an operating mining enterprise is stated and summarized. The metrological characteristics of the monitoring system have been calculated. It is shown that the described seismic network configuration can provide control of the entire near-side massive of the Zhelezny mine, with the exception of the upper horizons of the southwestern sides of the open pit. The data obtained during the operation with the system made it possible to establish relation that link the dynamics of microseismic activity in the near-board rock mass and the development of deformation processes. Based on the work results, a microseismic monitoring system was created that is capable of providing natural seismicity of the open pit rock mass stable long-term recording and identifying zones of active fracturing. This material is of interest to specialists engaged in geophysical control of the state of geological environments under technogenic impacts and geomechanics of open pit mining.

Key words: open pit mining, open pit, rock mass, monitoring, seismic method, seismic sensors, seismic network, metrological characteristics

For citation: Kozyrev A. A., Kagan M. M., Chernobrov D. S., Panasenko I. G. Microseismic monitoring system of the pit's board array based on seismic sensors in deep boreholes beyond the final pit contour. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):155-165. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_155.

Введение

Обеспечение устойчивости бортов карьеров в процессе их эксплуатации является сложной задачей, решаемой целым рядом организационно-технических мероприятий, в том числе организацией мониторинга состояния бортов различными методами [1, 2]. В случаях, когда борта карьеров сложены скальными грунтами, представляется целесообразным организация микросейсмического мониторинга [3, 4] прибортового массива. В настоящее время микросейсмический мониторинг является, по сути, единственным методом получения в реальном времени информации о процессах деструкции в глубине прибортового массива [5]. Микросейсмический мониторинг в карьерах, как правило, организуется на основе сейсмических сетей из сейсмодатчиков, установленных в скважинах различной глубины, пробуренных

в бортах карьера [6]. Однако, практика эксплуатации таких систем показывает, что срок эксплуатации таких сейсмосетей ограничен проводимыми на бортах карьера горными работами.

Ниже обсуждаются различные аспекты создания карьерной сейсмической сети на основе глубоких наклонных скважин с устьями, вынесенными за пределы конечного контура карьера. Такая организация сейсмосети обеспечивает возможность ее длительной эксплуатации вне зависимости от проводимых на бортах карьера горных работ. Работы проводились в карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа (Россия) [7].

Техническая реализация сейсмосети системы мониторинга

Скважины для размещения сейсмодатчиков

Сооружение глубоких наклонных скважин для установки сейсмодатчиков является наиболее технически сложной и дорогостоящей частью работ по созданию сейсмосети [8]. Исходя из имеющихся ресурсов было принято решение ограничится минимальным количеством скважин, достаточным для создания сейсмосети, охватывающей регистрацией значительную часть борта карьера, кроме того, из тех же соображений был выбран минимальный диаметр скважин, до-

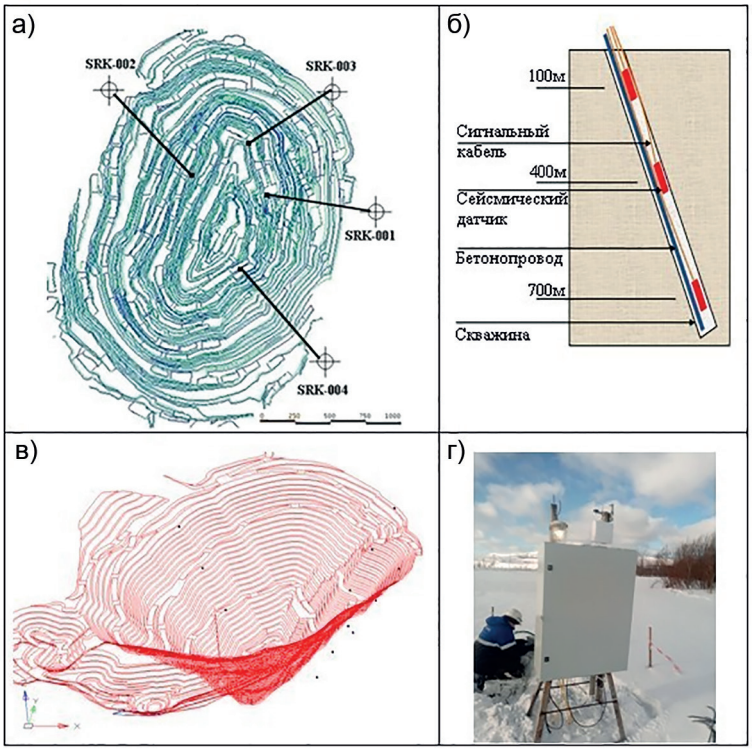

Рис. 1. Сейсмическая сеть в карьере, основанная на глубоких скважинах с устьями за границами конечного контура карьера: расположение скважин для сейсмических датчиков относительно поля карьера (а); расположения датчиков в скважинах (б); расположение сейсмодатчиков относительно бортов карьера (в); пункт регистрации на поверхности (г)

Fig. 1. Seismic network in open pit based on deep wells with wellheads beyond the final contour of a quarry: location of boreholes for seismic sensors relatively to open pit field (a); location of seismic sensors in boreholes (b); location of seismic sensors relatively to open pit walls (v); surface registration point near wellhead (g)

Параметры скважин для установки сейсмических датчиков
Parameters of boreholes for installing seismic sensors

№	№ скв.	*x*	*y*	*z*	Азимут	Угол, град.	Глубина, м	Диаметр
1	SRK_001	–1225	–419	212	278	55	1020	HQ (96 мм)
2	SRK_002	–2783	60	259	120	58	1040	
3	SRK_003	–1365	330	232	240	55	1040	
4	SRK_004	–1430	–1269	271	308	55	1100	

статочный для размещения сейсмодатчиков — HQ (96 мм).

Всего было пробурено 4 скважины с устьями, вынесенными за границы конечного контура карьера. Каждая скважина оснащалась тремя 3-х компонентными датчиками, расположенными на расстояниях 100, 400 и 700 м от устья. Параметры скважин приведены в таблице. На рис. 1 можно видеть пространственное расположение сейсмодатчиков в карьере и внешний вид ящика с оборудованием.

Аппаратура сейсмической сети

Сейсмические датчики

Диаметр скважин накладывал ограничения на геометрические размеры используемых в сети сейсмодатчиков, вследствие чего для установки были выбраны скважинные геофоны 3G28 производства Института горной сейсмологии (IMS) [9].

Данный тип сейсмических датчиков имеет следующие характеристики: собственная частота 28 Гц; диапазон 8,5—2000 Гц; чувствительность 13,5 В/м/с;

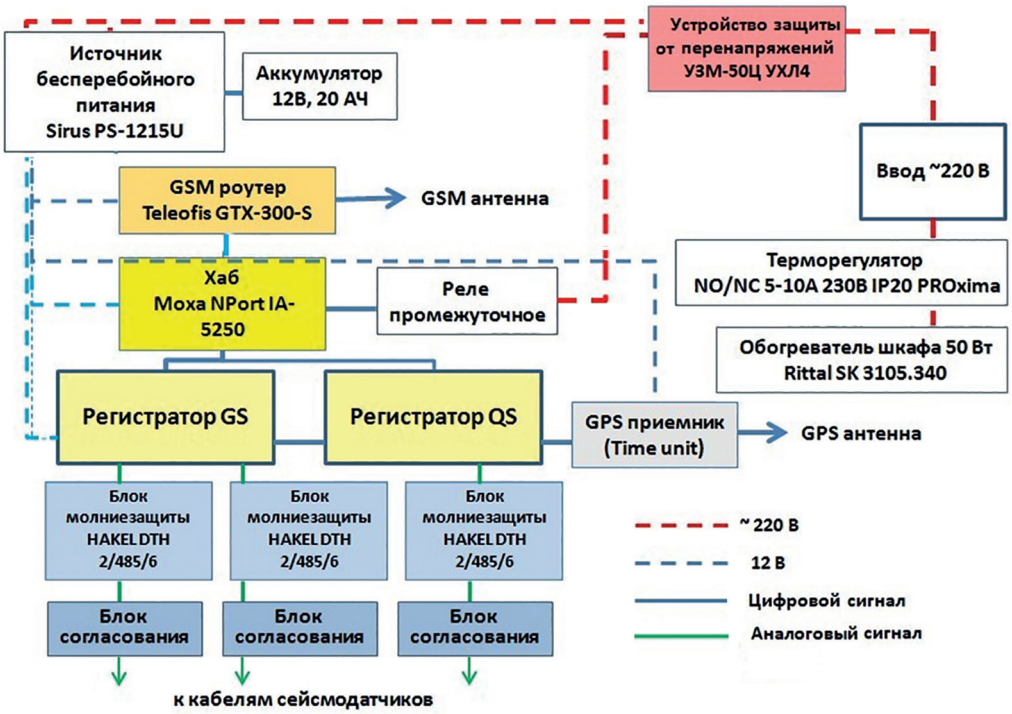

Рис. 2. Функциональная схема пункта удаленной сейсмической регистрации
Fig. 2. A functional scheme of a remote seismic registration point

сопротивление катушки 1500 Ом. Сигналы от сейсмических датчиков выводятся через сейсмические кабели. Физические параметры кабелей: диаметр — 10 мм, масса — 90 кг/км.

Вблизи устьев каждой скважины на поверхности размещаются пункты удаленной сейсмической регистрации в шкафах, защищенные по стандарту IP56 (рис. 1, *г*).

Пункты удаленной сейсмической регистрации

Сбор сейсмической информации в данной сейсмической сети выполняется на основе разработанного пункта удаленной сейсмической регистрации, реализующего прием и передачу информации от датчиков одной скважины на удаленный пункт сбора и обработки сейсмической информации. Каждый пункт регистрации включает в себя следующее основное оборудование:

- 2 сейсморегистратора производства IMS — обеспечивают оцифровку аналоговых сигналов от сейсмодатчиков (до 12 сейсмических каналов), выделение полезных сигналов и передачу их в обрабатывающий центр;
- GPS-модуль для точной привязки к мировому времени [10];
- сервер последовательного порта Moxa NPort IA-5250;
- GSM-маршрутизатор Teleofis GTX-300-S для связи сейсморегистраторов с обрабатывающим центром через интернет.

На рис. 2 приведена полная функциональная схема пункта удаленной регистрации.

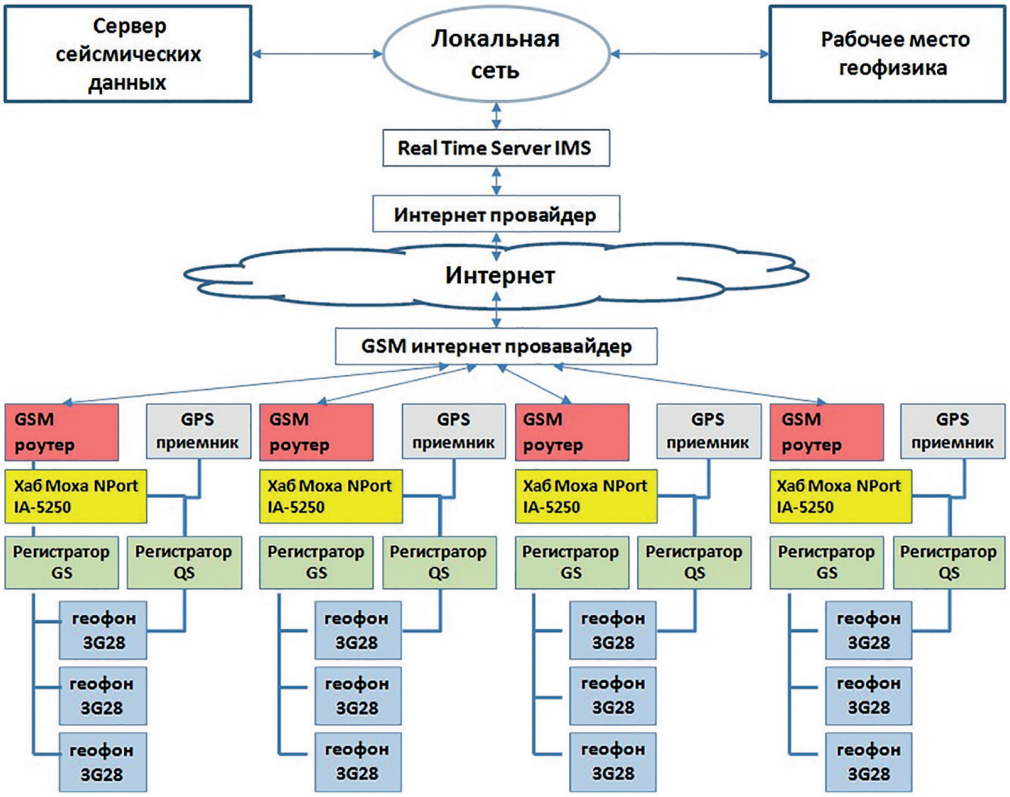

Рис. 3. Схема информационного обмена системы мониторинга

Fig. 3. A scheme of informational exchange of the monitoring system

Общая схема организации сейсмического мониторинга

Информационная система сейсмического мониторинга включает в себя:

- удаленные пункты регистрации;
- сервер реального времени (Real Time Server — RTS);
- сервер данных;
- рабочее место геофизика;
- рабочее место оператора.

Логическим центром системы является сервер RTS. Его задача — координация работы пунктов регистрации, сбор и объединение данных, собранных пунктами. Сервер RTS размещен в Горном институте КНЦ РАН. Связь аппаратуры пунктов с сервером осуществляется через мобильный интернет, для чего на каждом пункте установлен GSM-маршрутизатор. Сервера данных служит для хранения и первичной обработки собранных данных. Рабочее место геофизика обеспечивает возможности анализа собранной информации, оценки состояния системы и оперативного управления процессом мониторинга.

Схема информационного обмена системы мониторинга приведена на рис. 3.

Результаты работы системы мониторинга

Метрологические характеристики системы

Метрологические характеристики системы, а именно: энергетический порог регистрации, точность определения координат очагов и расчета механизмов разрушения пород в очагах определяются конфигурацией сети, т.е. количеством датчиков и их пространственным расположением в зоне контроля системы [11, 12].

Для количественного определения пороговых значений величины сейсмособытий, регистрируемых системой, необходимо знать зависимость между амплитудой скорости смещения породы в точке регистрации сейсмособытия, расстоянием до гипоцентра сейсмического события и его энергии [13]. Мы искали ее путем подбора по экспериментальным данным постоянных коэффициентов *A*, *B*, *C* в эмпирической формуле [9]:

$$\log(Am) = A \cdot \log(E) + B \cdot \log(R) + C\,, \quad (1)$$

где *Am* — амплитуда скорости смещения породы в точке регистрации сейсмособытия, мм/с; *R* — расстояние до гипоцентра сейсмособытия, м; *E* — энергия сейсмособытия, Дж.

Для определения коэффициентов *A*, *B* и *C* в уравнении (1) для конкретных физико-механических свойств массива пород карьера «Железный», был выполнен замер пиковых значений скоростей на сейсмограммах 281 сейсмических события, зарегистрированных сейсмической системой в диапазоне энергий 1–10^5 Дж, записанных сейсмодатчиками на расстояниях 50–2000 м.

Результаты замеров были обработаны методами регрессионного анализа средствами встроенного пакета анализа данных MS Excel [14]. В результате расчетов получились следующие значения коэффициентов множественной линейной регрессии:

$$A = 0{,}414,\ B = -1{,}675,\ C = -1{,}717.$$

Для сейсмической сети были выполнены расчеты ее метрологических характеристик. Рассчитывались распределения в пространстве ожидаемых погрешностей координат источников и минимальной энергии регистрируемых сейсмических событий. Расчет велся для узлов регулярной прямоугольной сетки с заданным шагом. В расчетах учитываются координаты пунктов регистрации, уровень сейсмического шума по месту установки сейсмодатчиков и эмпирические зависимости затухания сейсмических сигналов с расстоянием до источника.

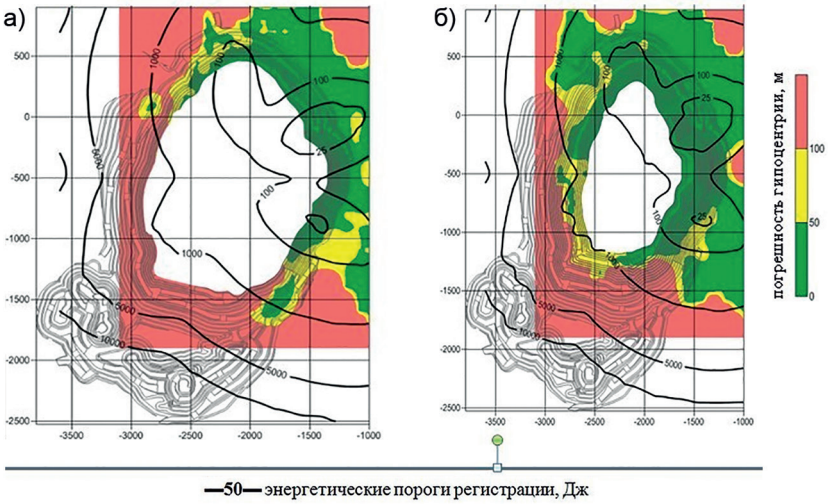

Рис. 4. Распределение метрологических характеристик системы мониторинга в плоскости XY на отметках Z = 0 м (а) и Z = –300 м (б)

Fig. 4. Distribution of metrological characteristics of monitoring system in XY plane at altitude above sea level: Z = 0 m (a), Z = 300 m (b)

На рис. 4 в графическом виде приведены расчетные погрешности в определении координат очагов для данной конфигурации сейсмической сети.

Из расчетов видно, что сейсмическая сеть, на верхних и средних горизонтах, обеспечивает приемлемое качество регистрации событий с энергетическим порогом 1 кДж на всем Восточном и Северном участках борта на большой глубине прибортового массива. На глубоких горизонтах (>300 м) качество регистрации ухудшается, но влияние процессов перестройки состояния массива в придонной части на устойчивость бортов невелико [15].

На рис. 5 представлено распределение регистрируемых системой сейсмических событий по энергиям [16]. Максимум распределения лежит в области

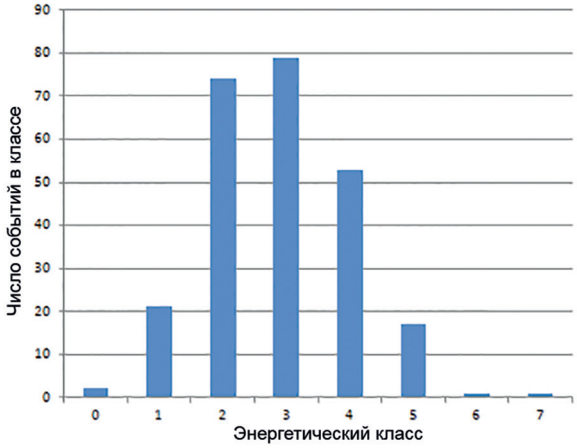

Рис. 5. Распределение событий по энергетическим классам

Fig. 5. Distribution of events according to energy classes

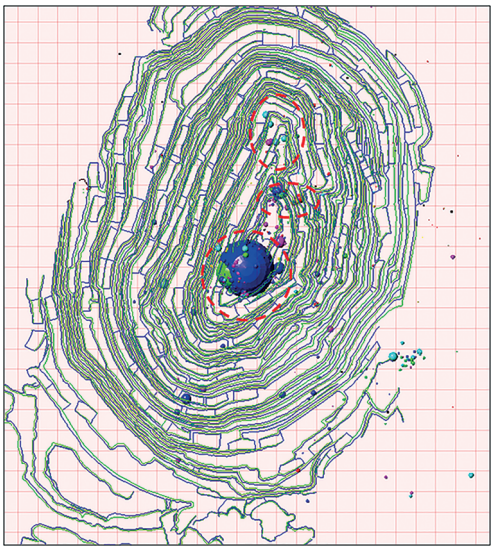

Рис. 6. Пространственное распределение естественных сейсмических событий в прибортовом массиве карьера (2020 г.). Сейсмические события обозначены кружками, размер которых определяется линейными размерами очагов

Fig. 6. Spatial distribution of natural seismic events in adjacent rock mass of the open pit (2020)

$10^2 – 10^3$ Дж, что, по-видимому, следует принять за нижнюю границу уверенной регистрации системы по всему полю сейсмического контроля.

Распределение сейсмических событий в прибортовом массиве карьера

В данной конфигурации системой зарегистрировано около 400 сейсмических событий, обусловленных процессами трещинообразования в прибортовом массиве (естественная сейсмоактивность). Было зарегистрировано шесть сейсмических события с энергией больше 10 000 Дж. Энергия наиболее мощного $4{,}5 \cdot 10^6$ Дж. Расчетная длина трещины в очаге — 45 м.

В пространственном распределении сейсмических событий с использованием методов кластерного анализа [17, 18] выявлена наиболее опасная зона в нижней части юго-западного участка борта под дном карьера на глубинах от –250 м до –350 м (рис. 6). Здесь наблюдаются проявления мощных событий с энергией более 10^5 Дж и частичным проявлением обрушений участков борта над выявленной сейсмоактивной зоной. Можно полагать, что повышенная сейсмоактивность под дном карьера в юго-западной его части обусловлена активизацией геологических структур в процессе формирования контура карьера, затрагивающей и вышележащие участки борта [19, 20].

Таким образом, созданная сейсмическая сеть из 12 датчиков, установленных в 4-х глубоких наклонных скважинах, обеспечивает мониторинг сейсмической активности восточного, северного и северо-западного участков борта карьера с энергетическим порогом 1 кДж.

Заключение

Система микросейсмического мониторинга прибортового массива карьера на основе сейсмических датчиков в глубоких скважинах за конечным контуром карьера позволяет регистрировать естественные сейсмические события в диапазоне от 1000 Дж по всему борту карьера за исключением южной и юго-западной его частей и глубоких горизонтов.

При эксплуатации системы выявлены сейсмоактивные зоны в нижней части карьера и южном участке борта.

Созданная система сейсмомониторинга обеспечивает устойчивую длительную регистрацию естественной сейсмичности прибортового массива карьера с выявлением зон активного трещинообразования.

Авторы выражают глубокую благодарность техническому директору ОАО «Ковдорский ГОК» А.А. Данилкину и Геологической службе ОАО «Ковдорского ГОКа» без организационного и технического участия которых данная работа была бы невыполнимой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маловичко Д. А.* Оценка сейсмической опасности в рудниках // Российский сейсмологический журнал. — 2020. — № 2(2). — С. 21—38. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.02.

2. *Haile A., Ross D., Maldonado A., Neyaz M., Rajbhandari C.* Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mines and Civil Engineering. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2020, pp. 415—426. DOI: 10.36487/acg_repo/2025_23.

3. *Goldswain G.* Advances in seismic monitoring technologies / Proceedings of the Second International Conference on Underground Mining Technology. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2020, pp. 173—188. DOI: 10.36487/acg_repo/2035_05.

4. *Петрик А. И.*, *Быховец А. Н.*, *Сохарев В. А.*, *Переин В. Н.*, *Сердюков А. Л.* Модернизация минерально-сырьевой базы в стратегии долгосрочного развития Ковдорского ГОКа // Горный журнал. — 2012. — № 10. — С. 12—18.

5. *Козырев А. А.*, *Савченко С. Н.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.*, *Рыбин В. В.*, *Федотова Ю. В.*, *Козырев С. А.* Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. — 470 с. DOI: 10.25702/KSC. 978-5-91137-391-7.

6. *Sharon R., Eberhardt E.* Guidelines for Slope Performance Monitoring. CSIRO Publishing, Clayton, 2020, 245 p. DOI: 10.1071/9781486311002

7. *Rybin V., Panin V., Kagan M., Konstantinov K.* Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses. 2018, vol. 1, pp. 551—556.

8. *Мещеряков К. А.*, *Яценко В. А.*, *Ильясов С. Е.*, *Окромелидзе Г. В.* Бурение скважин малого диаметра как способ снижения затрат при строительстве эксплуатационных и разведочных скважин // Территория Нефтегаз. — 2013. — № 10. — С. 28—31.

9. *Mounfort P., Mendecki A.* Mine seismology reference book: Seismic sensor. Institute of Mine Seismology, 2016, 64 p.

10. *Арзуманян А. Г.*, *Гомцян О. А.*, *Севоян О. Ж.* Синхронная система обработки и передачи данных с привязкой к шкале единого мирового времени // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2016. — № 1. — С. 3–7.

11. *Mendecki A.* Mine seismology reference book: Seismic hazard. Institute of Mine Seismology, 2016, 88 p.

12. *Разумов Е. Е.*, *Простов С. М.*, *Мулёв С. Н.*, *Рукавишников Г. Д.* Алгоритмы обработки сейсмической информации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 2. — С. 17—29. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

13. *Douglas J.* Ground motion prediction equations 1964—2019. United Kingdom, Glasgow: University of Strathclyde, 2019, 641 p.

14. *Каган М. М.*, *Чернобров Д. С.* Особенности распространения сейсмоволн в массиве скальных пород в прибортовой зоне карьера / Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: сборник научных статей. — СПб.: Реноме, 2013. — С. 222—229.

15. *Muqri M. R., Harper N., Muqri H., Wesr B. K.* Leveraging the power of Matlab, SPSS, Excel, and Minitab for statistical analysis and inference / 2018 ASEE Annual Conference & Exposition. 2018, pp. 95—102. DOI: 10.18260/1-2--30772.

16. *Glazer S. N.* Mine Seismology: Data Analysis and Interpretation. Springer International Publishing, 2016, 421 p. DOI: 10.1007/978-3-319-32612-2_3.

17. *Каган М. М.*, *Чернобров Д. С.* Пространственная кластеризация сейсмоактивности в прибортовой зоне карьера (на примере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S56. — С. 247—253.

18. *Woodward K., Wesseloo J., Potvin Y.* A spatially focused clustering methodology for mining seismicity // Engineering Geology. 2018, vol. 232, pp. 104—113.

19. *Лютоев В. А.* Оценка степени активности разломных зон на основе поведения микросейсм // Успехи современного естествознания. — 2018. — № 12(1). — С. 168—174. DOI: 10.17513/use.36992/

20. *Адушкин В. В.* Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. — М.: ИДГ РАН, 2015. — 364 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Malovichko D. A. Seismic hazard assessment in mines. *Russian Journal of Seismology*. 2020, no. 2(2), pp. 21—38. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.2.02.

2. Haile A., Ross D., Maldonado A., Neyaz M., Rajbhandari C. *Slope Stability 2020: Proceedings of the 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mines and Civil Engineering*. Australian Centre for Geomechanics, 2020, pp. 415—426. DOI: 10.36487/acg_repo/2025_23.

3. Goldswain G. Advances in seismic monitoring technologies. *Proceedings of the Second International Conference on Underground Mining Technology*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2020, pp. 173—188. DOI: 10.36487/acg_repo/2035_05.

4. Petrik A. I., Bykhovets A. N., Sokharev V. A., Perein V. N., Serdyukov A. L. Modernization of the mineral resource base in the strategy of long-term development of Kovdorsky GOK. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 10, pp. 12—18. [In Russ].

5. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V., Fedotova Yu. V., Kozyrev S. A. *Geomekhanicheskie protsessy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami* [Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management], Apatity, FITs KNTs RAN, 2019, 470 p. DOI: 10.25702/KSC. 978-5-91137-391-7.

6. Sharon R., Eberhardt E. *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. CSIRO Publishing, Clayton, 2020, 245 p. DOI: 10.1071/9781486311002

7. Rybin V., Panin V., Kagan M., Konstantinov K. Geophysical monitoring as an inherent part of the technological process in deep open pits. *Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses*. 2018, vol. 1, pp. 551—556.

8. Meshcheryakov K. A., YAtsenko V. A., Il'yasov S. E., Okromelidze G. V. Drilling of small diameter wells as a way to reduce costs during the construction of production and exploration wells. *Territorija Neftegas*. 2013, no. 10, pp. 28—31. [In Russ].

9. Mounfort P., Mendecki A. *Mine seismology reference book: Seismic sensor*. Institute of Mine Seismology, 2016, 64 p.

10. Arzumanyan A. G., Gomtsyan O. A., Sevoyan O. Zh. Synchronous data processing and transmission system with reference to the unified World time scale. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2016, no. 1, pp. 3–7. [In Russ].

11. Mendecki A. *Mine seismology reference book: Seismic hazard*. Institute of Mine Seismology, 2016, 88 p.

12. Razumov E. E., Prostov S. M., Mulev S. N., Rukavishnikov G. D. Seismic information processing algorithms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 17—29. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_17.

13. Douglas J. *Ground motion prediction equations 1964—2019*. United Kingdom, Glasgow: University of Strathclyde, 2019, 641 p.

14. Kagan M. M., Chernobrov D. S. Features of the propagation of seismic waves in the rock mass in the instrument area of the quarry. *Monitoring prirodnykh i tekhnogennykh protsessov pri vedenii gornykh rabot: sbornik nauchnykh statey* [Monitoring of natural and man-made processes during mining operations: collection of scientific articles], Saint-Petersburg, Renome, 2013, pp. 222—229.

15. Muqri M. R., Harper N., Muqri H., Wesr B. K. Leveraging the power of Matlab, SPSS, Excel, and Minitab for statistical analysis and inference. *2018 ASEE Annual Conference & Exposition*. 2018, pp. 95—102. DOI: 10.18260/1-2--30772.

16. Glazer S. N. *Mine Seismology: Data Analysis and Interpretation*. Springer International Publishing, 2016, 421 p. DOI: 10.1007/978-3-319-32612-2_3.

17. Kagan M. M., Chernobrov D. S. Spatial clustering of seismic activity in the instrument area of a quarry (using the example of Zhelezny mine of the Kovdorsky GOK). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S56, pp. 247—253. [In Russ].

18. Woodward K., Wesseloo J., Potvin Y. A spatially focused clustering methodology for mining seismicity. *Engineering Geology*. 2018, vol. 232, pp. 104—113.

19. Lyutoev V. A. Assessment of the degree of activity of fault zones based on the behavior of microseisms. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2018, no. 12(1), pp. 168—174. [In Russ]. DOI: 10.17513/use.36992/

20. Adushkin V. V. *Tekhnogennaya seysmichnost' — indutsirovannaya i triggernaya* [Technogenic seismicity — induced and trigger], Moscow, IDG RAN, 2015, 364 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козырев Анатолий Александрович[1] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: a.kozyrev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8440-4971,
Каган Михаил Моисеевич[1] — старший научный сотрудник,
e-mail: m.kagan@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7748-3288,
Чернобров Дмитрий Сергеевич[1] — младший научный сотрудник,
e-mail: d.chernobrov@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1602-9217,
Панасенко Игорь Георгиевич[1] — ведущий программист,
e-mail: i.panasenko@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1234-4137,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.
Для контактов: Чернобров Д.С., e-mail: d.chernobrov@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.A. Kozyrev[1], Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher,
e-mail: a.kozyrev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8440-4971,
M.M. Kagan[1], Senior Researcher,
e-mail: m.kagan@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-7748-3288,
D.S. Chernobrov[1], Junior Researcher,
e-mail: d.chernobrov@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1602-9217,
I.G. Panasenko[1], Leading Programmer,
e-mail: i.panasenko@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1234-4137,
[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: D.S. Chernobrov, e-mail: d.chernobrov@ksc.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 05.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 05.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.