



Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд

А.Ю. Абрашитов, В.С. Онуприенко, П.А. Корчак✉

Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация

✉ pkorchak@phosagro.ru

Резюме: В условиях интенсификации горных работ остро стоит вопрос обеспечения геодинамической безопасности. Проектирование и ведение горных работ должны учитывать инженерно-геологические условия месторождений и основываться на всесторонней оценке состояния горного массива. Разрабатываемые КФ АО «Апатит» месторождения апатит-нефелиновых руд характеризуются сложными геомеханическими и геодинамическими условиями. Показано развитие системы мониторинга геомеханических процессов – от первых систем контроля состояния массива на подземных рудниках до современного автоматизированного программно-аппаратного комплекса как локальных участков массива горных пород, так и всей зоны производственной деятельности предприятия. Представлены структура и основные параметры комплекса, подчеркнуты его достоинства в части использования компонентов российских производителей, современного программного обеспечения обработки, интерпретации, хранения информации. Дальнейшее развитие систем мониторинга позволит контролировать и управлять геомеханическими процессами при разработке удароопасных апатит-нефелиновых месторождений.

Ключевые слова: подземные горные работы, открытые горные работы, мониторинг сейсмичности, автоматизированные системы контроля, прогноз удароопасности

Для цитирования: Абрашитов А.Ю., Онуприенко В.С., Корчак П.А. Трехуровневая система сейсмического мониторинга массива горных пород Хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд. *Горная промышленность*. 2023;(S1):36–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42>

A three-tier system of seismic rock mass monitoring in the Khibiny apatite-nepheline ore deposits

A.Yu. Abrashitov, V.S. Onuprienko, P.A. Korchak✉

ovsk branch of JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation

✉ pkorchak@phosagro.ru

Abstract: Intensification of mining operations makes the issue of geodynamic safety very critical. Design and execution of mining operations needs to take into account engineering-geological conditions of deposits and should be based on a comprehensive assessment of the rock mass condition. Deposits of apatite-nepheline ores developed by the the Kirovsk Branch of Apatit JSC are characterized with complex geomechanical and geodynamic conditions. The paper demonstrates the evolution of the system to monitor geomechanical processes from the first systems to control the state of the rock mass in underground mines to the modern automated hardware and software suite for both the local sections of the rock mass and the whole active production zone of the company. The structure and the basic parameters of the suite are presented, its advantages in terms of using components of the Russian manufacturers, modern software for processing, interpretation, and storage of information are emphasized. Further development of the monitoring systems will allow to control and manage geomechanical processes when mining rock-bump hazardous apatite-nepheline deposits.

Keywords: underground mining, surface mining, seismicity monitoring, automated control systems, forecast of the rock-bump hazard

For citation: Abrashitov A.Yu., Onuprienko V.S., Korchak P.A. A three-tier system of seismic rock mass monitoring in the Khibiny apatite-nepheline ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):36–42. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-36-42>



Введение

Кировский филиал АО «Апатит» (КФ АО «Апатит») разрабатывает шесть месторождений апатит-нефелиновых руд Хибинского массива. Повышенный спрос на апатитовый концентрат обеспечивается за счет интенсификации подземных и открытых горных работ, что влечет за собой изменение напряженно-деформированного состояния массива горных пород, рост числа негативных проявлений горного давления.

Изучению изменения геодинамического режима массивов пород под воздействием горных работ посвящено большое количество исследований ученых как в России [1–3], так и за рубежом [4–6].

Для контроля геомеханического состояния массива горных пород широкое применение нашли системы деформационного, сейсмического мониторинга, которые позволяют в реальном времени отслеживать протекающие деформационные процессы [7–9].

В КФ АО «Апатит» для контроля состояния массива используется трехуровневая система сейсмоакустического и сейсмического мониторинга:

1. Сейсмический мониторинг зоны производственной деятельности КФ АО «Апатит».
2. Сейсмический мониторинг на подземных рудниках и карьерах.
3. Сейсмоакустический мониторинг участков массива горных пород на подземных рудниках.

Основной целью такой системы является обеспечение непрерывного регионального и локального сейсмического мониторинга с оперативным выявлением сейсмоактивных зон и оповещением структурных подразделений предприятия.

Мониторинг зоны производственной деятельности предприятия

На первом масштабном уровне для контроля зоны производственной деятельности КФ АО «Апатит» предприятием совместно с Кольским филиалом Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) создана объединенная система контроля сейсмичности массива (ОСКСМ), введенная в промышленную эксплуатацию в 2010 г. Задачей данной системы является получение информации о сейсмических событиях в пределах района производственной деятельности КФ АО «Апатит», включая как рудники, так и хвостохранилища. Надежная (или уверенная) регистрация сейсмических событий обеспечивается в диапазоне магнитуд от 0,6 и выше. Погрешность определения координат эпицентра в контролируемом районе находится в диапазоне от 100 до 1000 м в зависимости от удаленности от станций сейсмического мониторинга [10].

На точках регистрации КоФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 1), находящихся в г. Апатиты, селе Ловозеро (80 км на северо-восток от г. Апатиты) и в районе горы Оспе (18 км на запад от г. Апатиты), используется следующее оборудование (рис. 2): широкополосный сейсмометр CMG-3ESP, широкополосный сейсмометр STS-1, девять вертикальных и два горизонтальных сейсмометра GS-1. Со стороны КФ АО «Апатит» в ОСКСМ используются следующие типы сейсмометров: S1073 или S2123 («ИФЗ», Россия); A1638 («Геоакустика», Россия), в случае необходимости подключаются станции автоматизированной системы сейсмического мониторинга на Восточном руднике (АССМ ВР) (велосиметры HS-1 3 Component).



Рис. 1
Расположение станций
объединенной системы
контроля сейсмичности
массива

Fig. 1
Locations of stations in the
integrated system to control
the rock mass seismicity

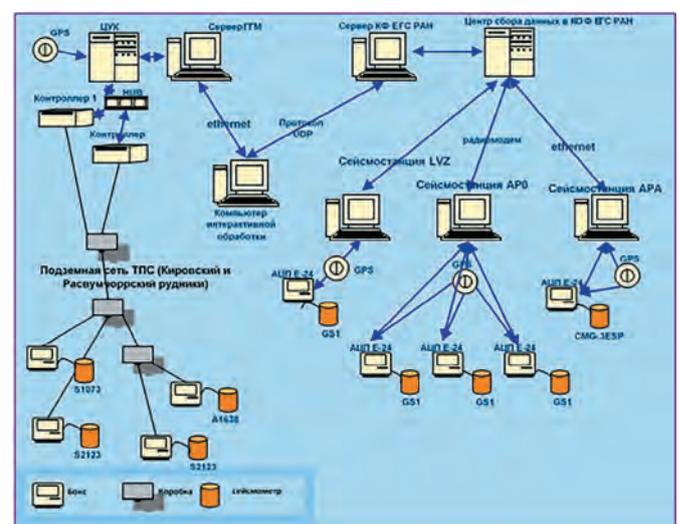


Рис. 2
Общая структурная схема
объединенной системы
контроля сейсмичности
массива

Fig. 2
A general structural scheme
of the integrated system
to control the rock mass
seismicity

При объединении сейсмических сетей были решены следующие задачи:

1. Разработаны конвертеры файлов волновых форм автоматизированной системы контроля сейсмичности массива (АСКСМ) в международный формат CSS 3.
2. Разработан клиент доступа к серверу КоФ ФИЦ ЕГС РАН для передачи волновых форм в подразделения КФ АО «Апатит» в режиме реального времени.
3. Разработана программа совместной локализации сейсмических событий LORS (локатор рудничных событий), позволяющая, в частности, использовать совместно данные как станций с привязкой к истинному времени (GPS), так и станций без такой привязки.
4. Выработана трехмерная скоростная модель массива горных пород зоны производственной деятельности КФ АО «Апатит».

В 2020 г. были завершены работы по обновлению программного комплекса LORS2. Для автоматической обработки сейсмических данных был разработан новый компонент LORS2 FosReader – программное обеспечение



автоматического детектирования и предварительной локализации событий по данным сетей КФ АО «Апатит». Локации сейсмических событий, происходящих на подземных рудниках, было уделено особое внимание, так как эти события происходят в среде с повышенным уровнем шума. Значительно расширены возможности визуализации данных, повышены удобство и скорость обработки. В настоящее время взаимодействие при эксплуатации ОСКСМ происходит следующим образом: программа FosClient, находящаяся на компьютере КФ АО «Апатит», обращается к программе-серверу, установленной в КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Сервер передает клиенту суточный список сейсмических событий, обнаруженных и слогированных автоматической системой КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Если в списке оказались новые (для клиента) события, клиент с помощью голосового интерфейса оповещает об этом дежурного геофизика и автоматически загружает с сервера волновые формы по станциям КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Также в фоновом автоматическом режиме на компьютере КФ АО «Апатит» происходит обработка сейсмических событий программой FosReader, которая ведет базу данных сейсмических событий. В случае необходимости дежурный геофизик в полуавтоматическом режиме объединяет базу данных КФ АО «Апатит» и КоФ ФИЦ ЕГС РАН и уточняет локацию сейсмических событий, если это необходимо, сохраняя результаты локализации и идентификации в обобщенной базе данных.

Мониторинг на подземных и открытых горных работах

На втором масштабном уровне для мониторинга массива горных пород при разработке месторождений подземным способом и прогноза региональной удароопасности эксплуатируются АСКСМ, позволяющие регистрировать сейсмические события с энергией $E > 102$ Дж и точностью в несколько метров. На Кировском руднике развернута АСКСМ, состоящая из 40 сейсмических пунктов, на Расвумчоррском руднике – из 22 (рис. 3).

Изначально, в 1982 г., АСКСМ создавалась для контроля отработки блока-целика 4–8 горизонта +250 м на Кукисвумчоррском месторождении, в качестве базового регистратора использовалась сейсмическая аппаратура, разработанная в Полярном геофизическом институте КФАН СССР. В 1985–1987 гг. в сотрудничестве с венгерской фирмой Geosltд была создана система цифровой обработки и телеметрической передачи сигналов из подземных павильонов с последующей обработкой информации на компьютере, в 1988 г. АСКСМ была распространена на все Кукисвумчоррское месторождение и введена в промышленную эксплуатацию. В 1994 г. в связи с отработкой блока целика АСКСМ была создана на Юкспорском месторождении, а в 2000 г. – на Расвумчоррском руднике [2; 11].

В 2007–2012 гг. силами НПО «Системотехника» была произведена глубокая модернизация эксплуатирующихся АСКСМ: разработаны и установлены телеметрические подсистемы сбора и обработки информации, включающие в себя центральный управляющий компьютер с GPS-часами, контроллер телеметрии, сеймопункты, состоящие из бокса телеметрии, блока бесперебойного питания, сейсмические датчики производства ИФЗ РАН, ООО «Геоакустика» (рис. 4).

Обработка и анализ сейсмической информации, полученной в результате функционирования систем АСКСМ, осуществляются централизованно группой геофизическо-

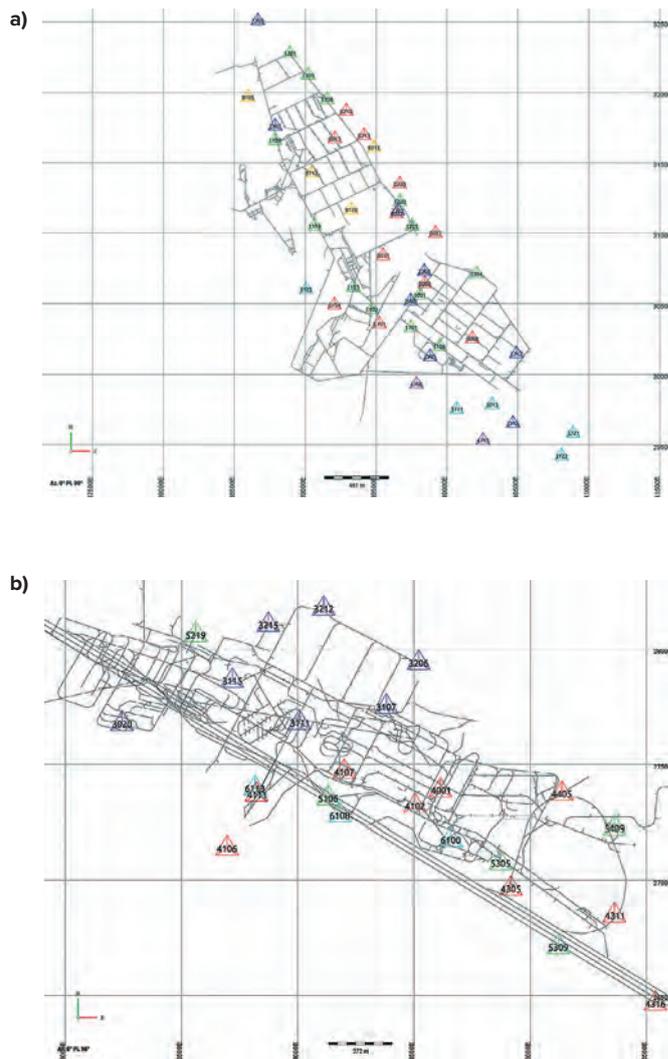


Рис. 3
Проекция расположения сеймопавильонов автоматизированной системы контроля сейсмичности массива:
а – горизонт +170 м Кировского рудника;
б – горизонт +530 м Расвумчоррского рудника

Fig. 3
A projection of the seismic points locations in the automated system to control the rock mass seismicity:
a The +170 m Level of the Kirovsk Mine;
b The +530 m Level of the Rasvumchorr Mine

го мониторинга, территориально находящейся на площадке Кировского рудника.

До 2012 г. обработка сейсмических событий, регистрируемых АСКСМ, осуществлялась в программе, разработанной в ГоИ КНЦ РАН для операционной системы IBM OS/2, но в связи с окончанием поддержки IBM OS/2, несоответствием программы обработки современным требованиям было принято решение о разработке программы обработки сейсмических сигналов (EDEV) (рис. 5) под операционную систему Windows [11]. Данная разработка была осуществлена специалистами НПО «Системотехника». Исползованные решения позволили существенно расширить перечень рассчитываемых параметров сейсмических событий: время, координаты, энергия сейсмического события, сейсмический момент, угловая частота, статический и динамический сброс напряжения, параметры механизма очага.

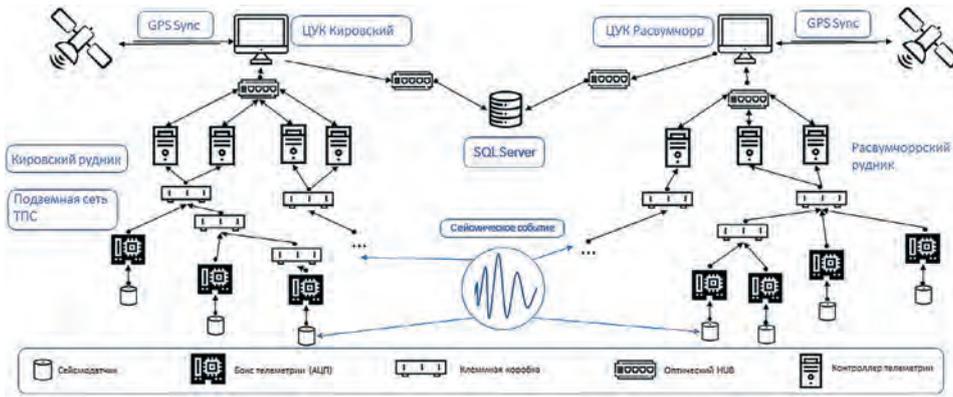


Рис. 4
Общая структурная схема
автоматизированной системы
контроля сейсмичности массива

Fig. 4
A general structural scheme of the
automated system to control the
rock mass seismicity

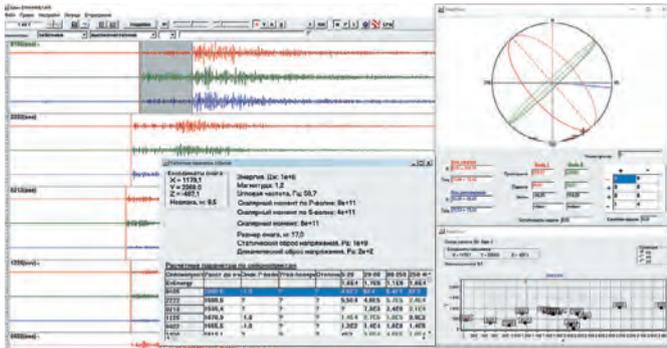


Рис. 5
Окно программы обработки
сейсмических данных EDEV

Fig. 5
A screen of the EDEV seismic
data processing program

Для анализа получаемой информации в настоящий момент используется программное обеспечение разработки ГоИ КНЦ РАН, в основу которой заложена методика выделения зон региональной удароопасности на основании трех параметров: время, координаты, энергия сейсмических событий (рис. 6). Методика подробно описана в «Указаниях по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам».

В начале 2022 г. совместно с Институтом шахтной сейсмологии IMS (Австралия) начата реализация уникального проекта по интеграции программного обеспечения Vantage со сторонними сетями сейсмического мониторинга. Программа позволяет анализировать и визуализировать данные независимых параметров очагов сейсмических событий, таких как энергия, геометрический момент, тензор сейсмического момента и другие. Возможна оценка

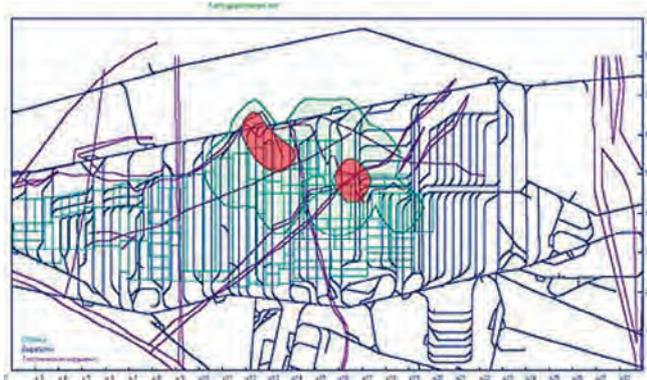


Рис. 6
Пример получаемой выходной
информации, карта
удароопасных зон

Fig. 6
An example of the output
data, a map of the rock-bump
hazardous zones

сейсмического режима с помощью графиков повторяемости, графиков зависимости независимых параметров очага, интерполяции данных о сейсмических очагах по сетке, кластеризация сейсмических событий и др. Использование данных об объеме очистных работ совместно с интенсивностью сейсмических событий также возможно. Внедрение данного продукта, по нашим оценкам, существенно расширит анализ параметров источника сейсмических событий, позволит производить сложные аналитические оценки сейсмического режима в краткие сроки, повысит точность определения сейсмоактивных зон, повысит вероятность прогноза потенциально разрушительных сейсмических событий (рис. 7).

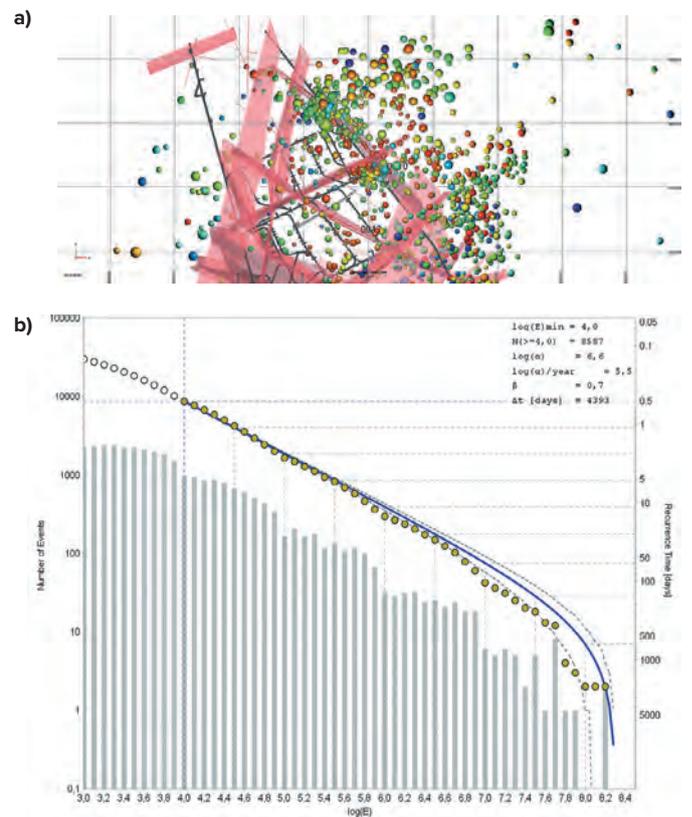


Рис. 7
Проекция гипоцентров
сейсмических событий на
буродоставочные горизонты
откаточного горизонта +170 м,
Кукисвумчорское крыло
Кировского рудника – а;
график повторяемости,
отражающий вероятности
возникновения сейсмических
событий различной энергии – б

Fig. 6
a – is projection of the seismic
event hypocenters on the drill
haulage workings of the +170
m haulage level,
Kukisvumchorr wing of the
Kirov mine;
b – is a recurrence graph that
reflects the probabilities of
seismic events of various
energies



В 2019 г. в связи с интенсификацией работ на карьерах и ведением подземных горных работ на смежном месторождении вблизи открытой выемки Ньоркпахкского месторождения руководством КФ АО «Апатит» принято решение о развертывании АССМ ВР, ведущем разработку Коашвинского и Ньоркпахкского месторождений.

АССМ ВР состоит из 12 сейсмических станций, объединенных в общую сеть с ядром сбора и автоматической обработки данных на базе высокопроизводительного серверного компьютера со специальным программным обеспечением (рис. 8).



Рис. 8
Космоснимок района ведения открытых работ с нанесенным положением сейсмопунктов автоматизированной системы сейсмического мониторинга

Fig. 8
A satellite image of the surface mining area with the locations of seismic points in the automated system of seismic monitoring

Каждая станция состоит из регистратора геофизических сигналов на базе 24-битного АЦП (ЕРМАК-5) и трёхкомпонентного велосиметра (HS-1 3 Component), установленно-го в скважину. Для осуществления локации источников сейсмического сигнала в массиве горных пород данные мониторинга синхронизируются по времени при помощи встроенного в регистратор GPS/GLONASS приёмника. Передача данных в режиме, близком к реальному времени, осуществляется при помощи GSM роутера через сеть интернет по защищённому VPN туннелю (рис. 9).

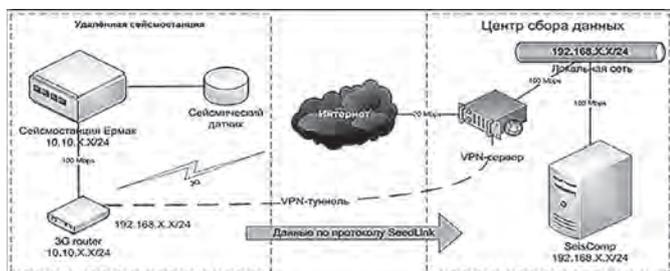


Рис. 9
Общая структурная схема автоматизированной системы сейсмического мониторинга

Fig. 9
A general structural scheme of the automated system of seismic monitoring

При создании АССМ одной из проблем, с которой пришлось столкнуться исполнителям, явилась необходимость обеспечения сейсмопавильонов непрерывным электропитанием, что в условиях непрерывного ведения горных работ и удаления некоторых станций от электрических



Рис. 10
Автоматизированная система сейсмического мониторинга:
a – сейсмопункт;
b – ветрогенератор

Fig. 10
The automated system of seismic monitoring:
a is a seismic station;
b is a wind generator

источников является нетривиальной задачей. Данная проблема была решена с помощью ветрогенераторов (рис. 10).

Данные станций собираются и обрабатываются на сервере, представляющем собой отдельный компьютер серверного исполнения с системой резервного питания и дублирования сохраненных данных. Для обработки данных с целью детектирования и локации сейсмических событий используются автоматизированные программы, разработанные в КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Результаты обработки в виде сейсмических бюллетеней и карт передаются в КФ АО «Апатит».

Мониторинг локальных участков на подземных рудниках

Третий уровень мониторинга представлен разработкой Института горного дела ДВО РАН – автоматизированной сейсмоакустической системой контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz-ADS». АСКГД предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород импульсов сейсмоакустической эмиссии (являющихся следствием упругого разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0,2...12 кГц, определения их параметров (энергии, координат, спектральных и иных характеристик акустических событий) и представления результатов мониторинга в виде каталогов, карт.

Первые испытания АСКГД «Prognoz-ADS» в условиях подземных рудников КФ АО «Апатит» были начаты в 4-м квартале 2015 г. совместно со специалистами Научного центра проблем геомеханики и горного производства Санкт-Петербургского горного университета и ИГД ДВО РАН. На блоке 7/10 Кукисвумчоррского месторождения была установлена система, состоящая из 12 сейсмоакустических датчиков, данные с которых через цифровые приемники-преобразователи поступают в подземную аппаратную, расположенную на горизонте откатки, где установлены коммуникационный шкаф и источники бесперебойного питания (рис. 11) [12; 13].

Наиболее представительные данные о характере изменения акустической активности массива горных пород в блоке 7/10, отражающие процесс подготовки крупного геодинамического события, были получены в январе 2016 г. В этот период на гор. +236 м наблюдался рост сейсмоактив-

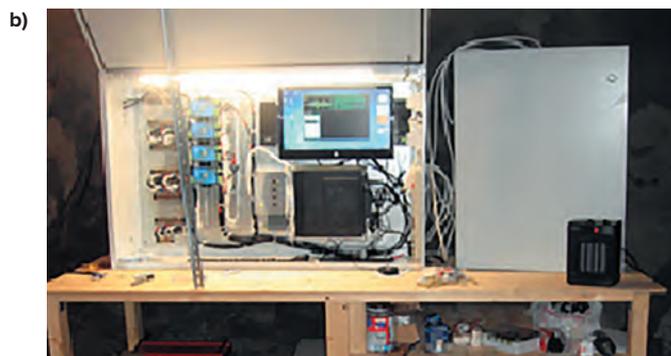
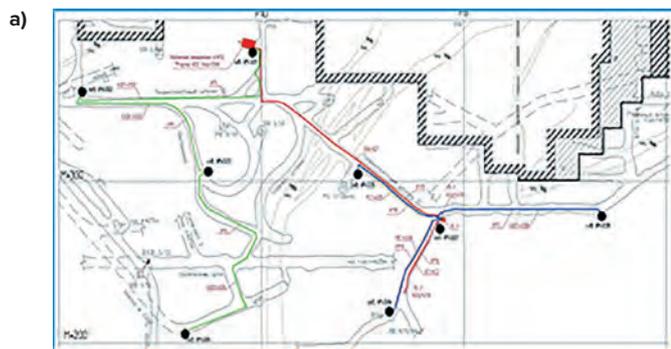


Рис. 11
Схема расположения сейсмоакустических датчиков на отметке +452 м Расвумчоррского рудника – а; подземная аппаратная – б

Fig. 11
a is a schematic layout of the seismoacoustic sensors at the +452 m level of the Rasvumchorr mine; b is an underground control room

ности по данным АСКСМ и формирование акустически активной зоны по данным АСКГД, где 27.01.2016 г. произошел микроудар, в результате которого были разрушены кровля и стенки участков выработок (рис. 12).

В 2020 г. АСКГД «Prognoz ADS» для мониторинга геомеханического состояния участка массива горных пород, находящегося под влиянием крупных геодинамически активных тектонических нарушений, была установлена на Расвумчоррском руднике. В марте 2021 г. по данным АСКСМ и АСКГД «Prognoz-ADS» был выявлен всплеск сейсмоак-

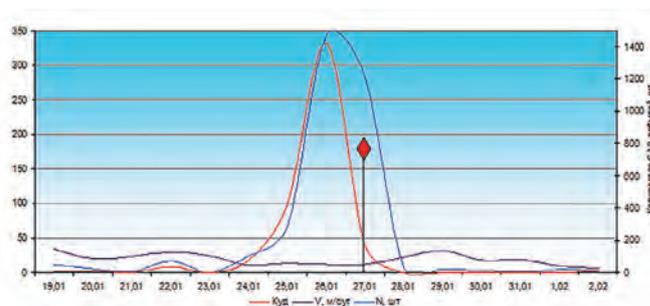


Рис. 12
Графики изменения параметров акустической активности в период подготовки и реализации микроудара в блоке 7/10 Кировского рудника: $K_{уд}$ – показатель удароопасности; v – скорость миграции акустически активной зоны; N – количество акустических событий

Fig. 12
Graphs of changes in the acoustic activity parameters during preparation and execution of a microshock in Block 7/10 of the Kirovsk mine: $K_{уд}$ the rock-bump hazard index; v the migration rate of the active acoustic zone; N the number of acoustic events

тивности в лежачем боку рудной залежи. Анализ данных показал схожесть протекающих в массиве процессов с развитием событий, предшествующих горно-тектоническому удару, произошедшему 09.01.2018 г. На комиссии по горным ударам Расвумчоррского рудника с участием специалистов ГОИ КНЦ РАН и ИЦ ГиППП СПГУ были разработаны мероприятия по снижению уровня сейсмической активности в массиве горных пород, реализация которых позволила продолжить ведение горных работ в нормальных условиях.

Заключение

Представленный в статье программно-аппаратный комплекс и его постоянное совершенствование позволяют не только выделять и контролировать параметры сейсмически и акустически-активных и потенциально удароопасных зон, но и оперативно и эффективно контролировать их, а также управлять геомеханическими процессами, происходящими в массиве горных пород при отработке месторождений апатит-нефелиновых руд.

Список литературы

1. Рассказов И.Ю. *Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона*. М.: Горная книга; 2008. 329 с.
2. Мельников Н.Н. (ред.) *Сейсмичность при горных работах*. Апатиты: Кол. науч. центр РАН; 2002. 325 с.
3. Маловичко Д.А. Оценка сейсмической опасности в рудниках. *Российский сейсмологический журнал*. 2020;2(2):21–38. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>
4. He M., Xia H., Jia X., Gong W., Zhao F., Kangyuan L. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012;4(2):97–114. <https://doi.org/10.3724/SPJ.1235.2012.00097>
5. Liu J.-P., Feng X.-T. Case Histories of Rockbursts at Metal Mines. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier; 2018, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
6. Foulger G.R., Wilson V. P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
7. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. In: Wesseloo J. (ed.) *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2017, pp. 125–139, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1704_07_Dineva
8. Козырев А.А., Онуприенко В.С., Жукова С.А., Журавлева О.Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях. *Горный журнал*. 2020;(9):19–26. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
9. Anikin P., Kursakin G., Fedotova I. Improvement of the automated seismic and acoustic monitoring system “Prognoz-ADS” main elements. *E3S Web of Conferences*. 2020;192:04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204014>



10. Аккуратов М.В., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Корчак П.А. Объединение сейсмических сетей ОАО «Апатит» и Кольского филиала геофизической службы РАН. В кн.: *Наука и образование – 2011: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 4–8 апреля 2011 г.* Мурманск: МГТУ; 2011.
11. Корчак П.А., Жукова С.А., Меньшиков П.Ю. Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит». *Горный журнал*. 2014;(10):42–46. Режим доступа: <https://www.rudmet.ru/journal/1354/article/23221/>
12. Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Сидляр А.В., Корчак П.А. Совершенствование автоматизированной системы геомеханического мониторинга и раннего предупреждения опасных геодинамических явлений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(12-1):106–121. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106
13. Константинов А.В., Ломов М.А., Терешкин А.А., Рассказов М.И., Цой Д.И. Исследование конфигураций приемных антенн наблюдательной сети геофонов системы «Prognoz-ADS». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(5-2):93–102. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_93

References

1. Rasskazov I.Yu. *Monitoring and management of the rock pressure in underground mines of the Far East Region*. Moscow: Gornaya kniga; 2008. 329 p. (In Russ.)
2. Melnikov N.N. (ed.) *Seismicity in mining*. Apatity: Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2002. 325 p. (In Russ.)
3. Malovichko D.A. Assessment of seismic hazard in mines. *Russian Journal of Seismology*. 2020;2(2):21–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.02>
4. He M., Xia H., Jia X., Gong W., Zhao F., Kangyuan L. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012;4(2):97–114. <https://doi.org/10.3724/SPJ.1235.2012.00097>
5. Liu J.-P., Feng X.-T. Case Histories of Rockbursts at Metal Mines. In: Feng X.-T. (ed.) *Rockburst: Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Elsevier; 2018, pp. 47–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2>
6. Foulger G.R., Wilson V. P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2018;178:438–514. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
7. Dineva S., Boskovic M. Evolution of seismicity at Kiruna Mine. In: Wesseloo J. (ed.) *Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*, Australian Centre for Geomechanics, Perth; 2017, pp. 125–139, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1704_07_Dineva
8. Kozyrev A.A., Onuprienko V.S., Zhukova S.A., Zhuravleva O.G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(9):19–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.02>
9. Anikin P., Kursakin G., Fedotova I. Improvement of the automated seismic and acoustic monitoring system “Prognoz-ADS” main elements. *E3S Web of Conferences*. 2020;192:04014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019204014>
10. Akkuratov M.V., Asming V.E., Vinogradov Yu.A., Korchak P.A. Merging of seismic networks of the Apatite JSC and Kola Branch of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences.. In: *Science and Education - 2011: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, April 4–8, 2011*. Murmansk: Murmansk State Technical University; 2011.
11. Korchak P.A., Zhukova S.A., Menshikov P.Yu. Seismic monitoring build-up and development in the production activity zone of Apatit JSC. *Gornyi Zhurnal*. 2014;(10):42–46. (In Russ.) Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/1354/article/23221/>
12. Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu.V., Anikin P.A., Sidlyar A. V., Korchak P.A. Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(12-1):106–121. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_121_0_106
13. Konstantinov I.V., Lomov M.A., Tereshkin A.A., Rasskazov M.I., Tsoi D.I. Analysis of receiving antenna configurations in geophone network of Prognoz-ADS system. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(5-2):93–102. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_52_0_93

Информация об авторах

Абрашитов Андрей Юрьевич – директор, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация

Онуприенко Вячеслав Сергеевич – главный инженер, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация

Корчак Павел Анатольевич – начальник отдела развития горно-геологических информационных систем, Кировский филиал АО «Апатит», г. Кировск, Российская Федерация; e-mail: pkorchak@phosagro.ru

Information about the authors

Andrey Yu. Abrashitov – Director, Kirovsk branch of JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation

Vyacheslav S. Onuprienko – Chief Engineer, Kirovsk branch of JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation

Pavel A. Korchak – Head of the Development Department of Mining and Geological Information Systems, Department for the Development of Mining Operations, Kirovsk branch of JSC “Apatit”, Kirovsk, Russian Federation; e-mail: pkorchak@phosagro.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 08.01.2023

Поступила после рецензирования: 23.01.2023

Принята к публикации: 24.01.2023

Article info

Received: 08.01.2023

Revised: 23.01.2023

Accepted: 24.01.2023