

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОСТОЧНОГО РУДНИКА КФ АО «АПАТИТ»: ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ РЕШЕНИЯ

В.Э. Асминг¹, А.В. Федоров¹, И.С. Федоров¹, В.С. Онуприенко², А.А. Стрешнев²

¹ Кольский филиал Федерального исследовательского центра
«Геофизическая служба» РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: astreshnev@phosagro.ru

² Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

Аннотация: Рассмотрено создание автоматизированной системы сейсмического мониторинга для промышленной площадки Восточного рудника КФ АО «Апатит» (АССМ ВР), которая расположена в Хибинском массиве Кольского полуострова. Сеть наблюдения включает 11 сейсмических станций, окружающих область двух карьеров: Коашва и Ньюрклахк. Регистрация колебаний осуществляется с помощью велосиметров NS-1, подключенных к регистраторам сейсмических сигналов «Ермак-5». Данные передаются в центр сбора и обработки в реальном времени с помощью сотовой связи. Для питания сейсмических станций используются автономные системы, основанные на ветрогенераторах. Чтобы максимизировать точность определения координат сейсмических событий для зоны наблюдения, была создана трехмерная модель среды, учитывающая как естественный рельеф, так и отработанное пространство. Физические свойства среды были уточнены согласно ранее полученным данным сейсмического профилирования и петрофизическим свойствам пород. Для того чтобы лоцировать сейсмические события, используя такую модель среды, были разработаны специальные алгоритмы, основанные на представлении среды в виде стохастического графа. В результате работы АССМ ВР за период 2020–2022 гг. были обнаружены зоны проявления естественной сейсмичности в области мониторинга. Накопление данных сейсмического мониторинга делает возможным наблюдение сезонных вариаций в сейсмической активности. Первые результаты работы системы зададут основу для решений, направленных на уменьшение рисков от влияния горных работ в карьерах Восточного рудника КФ АО «Апатит».

Ключевые слова: карьер, рудник, сейсмический мониторинг, сейсмическая сеть, сейсмическая станция, землетрясение, горный удар, детектирование, локация.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-01471-22).

Для цитирования: Асминг В. Э., Федоров А. В., Федоров И. С., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Автоматизированная система сейсмического мониторинга Восточного рудника КФ АО «Апатит»: программно-аппаратные решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 8. – С. 45–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_45.

Automated seismic monitoring in Vostochny Mine of Apatit's Kola Branch: Hardware/software solutions

V.E. Asming¹, A.V. Fedorov¹, I.S. Fedorov¹, V.S. Onupriyenko², A.A. Streshnev²

¹ Kola branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia, e-mail: astreshnev@phosagro.ru

² Kirovsk branch of JSC «Apatit», Kirovsk, Russia

Abstract: This study concentrates on creation of an automated seismic monitoring system at the industrial infrastructure of Vostochny Mine, Apatit's Kola Branch–ASM VM–in the Khibiny Massive on the Kola Peninsula. The monitoring network embraces 11 seismic stations arranged around the mining area of two open pit mines: Koashva and Niorkpakhk. Seismic vibrations are recorded by velocimeters HS-1 connected to seismic recorders Ermak-5. The data are sent to an information accumulation and processing center in real time via cellular communication. The seismic stations are supplied by independent systems of wind power generators. For maximizing precision of seismic event coordinates in the test area, a 3D model is built including the natural landscape and the mined-out space. The physical properties of the medium are revised with the help of the earlier information on seismic profiling and rock petrophysics. For locating seismic events using this model, the dedicated algorithms are developed based on the representation of the medium as a stochastic graph. Over the period of 2020–2022, ASM VM disclosed natural seismicity zones within the monitoring field. When accumulated, the seismic monitoring data enable tracing seasonal variations in seismic activity. The research findings provide grounds for the risk reduction in open pit mining in Vostochny Mine of Apatit's Kola Division.

Key words: open pit mining, underground mine, seismic monitoring, seismic networks, seismic station, earthquake, rock burst, detection, location.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. 075-01471-22.

For citation: Asming V. E., Fedorov A. V., Fedorov I. S., Onupriyenko V. S., Streshnev A. A. Automated seismic monitoring in Vostochny Mine of Apatit's Kola Branch: Hardware/software solutions. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(8):45-62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_8_0_45.

Введение

Хибинский массив, расположенный в центральной части Кольского полуострова, является крупной палеозойской щелочной интрузией, соединенной с региональным тектоническим разломом. Он имеет овальную форму, размер около 1300 км² (36×45 км) и расположен выше окружающей его равнины Кольского полуострова примерно на 900–1000 м. Комплекс относится к Кольской щелочной провинции Балтийского щита [1].

На территории Хибинского массива обрабатываются несколько больших месторождений апатит-нефелиновых руд. Наибольшие из них обрабатываются Кировским Филиалом АО «Апатит», как подземным способом, так и открытыми горными работами.

Хибинский массив имеет сложное иерархически-блочное строение, сопряженное с высоким уровнем тектонических напряжений, что подтверждается множеством исследований, а также

проявляется в процессе горных работ [2–4].

Длительная отработка запасов апатит-нефелиновых месторождений, извлечение и перемещение 4,5 млрд т пород в Хибинском массиве привели к изменению локального геодинамического равновесия и возрастанию сейсмической активности данной части массива, а также уровня деформаций в нем [5]. По мере разработки месторождений на рудниках КФ ОА «Апатит» были отмечены все формы динамических проявлений горного давления — от внешних признаков удароопасности, таких как шелушение, динамическое заколообразование и стреляние, до горных ударов как локального, так и регионального происхождения [6–8].

Авторы этих работ разделяют причины динамических проявлений горного давления на естественные (действие горизонтальных тектонических напряжений на массив, высокие упругие свойства горных пород, способных к хрупкому разрушению, и присутствие тектонических неоднородностей) и техногенные (ослабление внутривластных связей массива вместе с нарушением устойчивости блоков как результат воздействия на массив горных работ). Места пространственного скопления сейсмических событий в Хибинском массиве связаны с зонами активных горных работ и положением как существующих, так и возникающих нарушений [9].

Как было отмечено выше, КФ АО «Апатит» является крупнейшим горнодобывающим предприятием Хибин. Здесь сформировался один из самых больших горнодобывающих комплексов северно-западной части России, включающий в себя три рудника: Кировский, Расвумчоррский и Восточный [10, 11].

Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской акаде-

мии наук» (КоФ ГС РАН) занимается мониторингом сейсмической активности по всей территории Кольского полуострова, используя региональную сейсмическую сеть [12]. Для локализации сейсмических событий была выработана региональная скоростная модель [13].

В 2010 г. была проведена работа по объединению данных КоФ ФИЦ ЕГС РАН и АО «Апатит». В результате была разработана система мониторинга Хибинского массива ОСКСМ (Объединенная система контроля сейсмичности массива) [14], которая была обновлена в 2020 г. [15].

ОСКСМ способна обнаруживать сейсмические события внутри Хибинского массива и на окружающих территориях. Для западной части массива, в которой расположены сети Кировского и Расвумчоррского рудников, точность локализации очень высока, в то время как в восточной части массива уровень обнаружения сейсмических событий значительно ниже.

В 2020 г. было принято решение о создании сети сейсмического мониторинга на Восточном руднике КФ АО «Апатит», который включает два карьера: Ньоркпахк и Коашва. Эта работа была выполнена совместно со специалистами из КоФ ФИЦ ЕГС РАН и КФ АО «Апатит».

При проектировании сети, выборе оборудования и алгоритмов обработки данных был учтен опыт зарубежных и российских коллег. В первую очередь, упомянем работы сейсмологов Финляндии, разработавших систему регионального сейсмического мониторинга с распознаванием типов сейсмических событий [16], а также локальную сейсмическую сеть вокруг атомной электростанции [17]. Из отечественных разработок интересен опыт мониторинга Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей [18], месторождения Шактау [19]. Коллегами из Пермского горного инсти-

тута были выполнены оценки сейсмического эффекта массовых взрывов [20, 21], которые были использованы при выборе мест установки сейсмопунктов.

Конфигурация сети и оборудование

При выполнении сейсмического мониторинга карьеров и подземных рудников важно гарантировать максимальную точность определения гипоцентров сейсмических событий и минимальный энергетический порог регистрации. Эти два параметра являются критически важными с точки зрения определения возможных триггерных структур для дальнейшего смягчения риска.

Точность определения координат сейсмических событий наибольшим образом определяется геометрией сейсмической сети. На стадии проектирования АССМ ВР была проведена работа по определению возможных ошибок локации, с использованием математического моделирования.

Изначальные положения сейсмических станций в моделировании были выбраны для того, чтобы гарантировать азимутальное покрытие зоны наблюдения, близкое к однородному, доступность условий для обеспечения электропитания, а также учитывать планы горных работ по отработке месторождения рудником, для того чтобы гарантировать жизнеспособность системы.

Для реализации процедур локации сейсмических событий было решено остановиться на использовании времен первых приходов объемных волн P и S на датчики. Поверхностные волны, сигналы которых хотя и присутствуют на ряде записей локальных сейсмособытий, для локации не годятся ввиду невозможности относительно точного определения моментов их приходов (значительно более низкочастотные, чем объемные) и непостоянства их скоростей.

Для оценки ошибок локации была разработана программа, использующая метод Монте-Карло. В программе задаются предполагаемая конфигурация сети, ожидаемые систематические ошибки скоростной модели, случайные ошибки в определении первых вступлений P - и S -волн и случайные ошибки в определении азимута к источнику по поляризации P -волны.

Рассматриваемая область разделяется на квадраты, для каждого квадрата вычисляется средняя ошибка локации в километрах. Для того чтобы это сделать, внутри квадрата случайным образом генерируются точки, которые, как считается, являются местами сейсмических событий. Для каждого из событий вычисляются времена прихода волн на сейсмические станции, случайные ошибки, соответствующие измерениям времени, и систематические ошибки, соответствующие ошибкам скоростной модели, добавленным к ним.

Для того чтобы провести оценку ожидаемых ошибок в определении координат событий, для заданного покрытия станций АССМ ВР были сделаны следующие предположения: оценка погрешностей измерений времен P и S составляет 0,02 с (при варианте шага 0,005 с, что соответствует 4 отсчетам), оценка неопределенности скоростной модели (скоростей P - и S -волн) — 0,1 км/с, ошибки в оценке азимута из поляризации P -волны — 5°.

Моделирование проводилось для сетей из 10 — 12 сейсмоприемников с максимальным расстоянием между ними 10 км (рис. 1) без учета глубин источников и высот приемников.

Результат моделирования, с учетом вышеупомянутых предположений, выбранной конфигурации сети сейсмических станций показан на рис. 1.

Эта конфигурация обеспечивает точность определения координат сейсмиче-

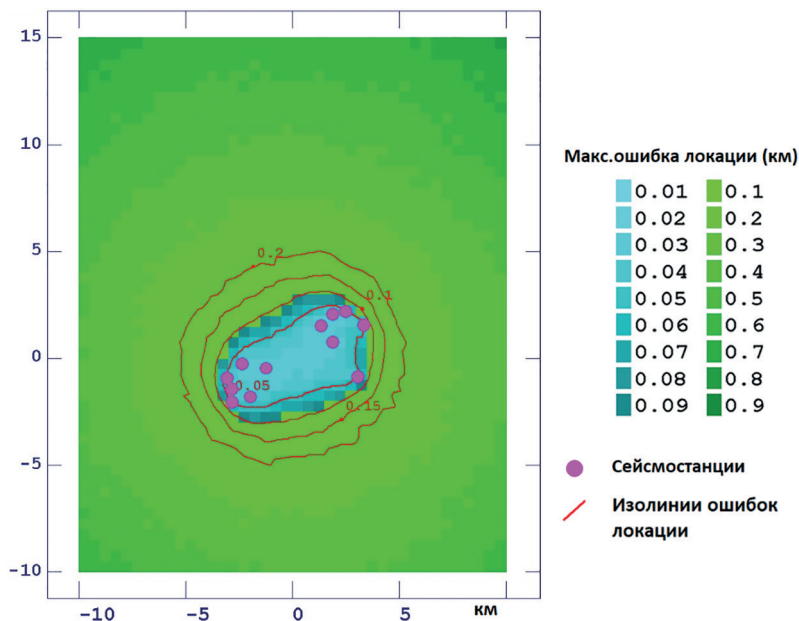


Рис. 1. Карта модели ошибок локации для выбранной конфигурации сети сейсмического мониторинга ASSM VR

Fig. 1. Map of model location errors for the selected configuration of ASSM VR seismic network

ских событий с ошибкой не более 50 м в центре сети и 200 – 300 м на расстоянии 5 км за ее пределами.

Для сети были использованы трехкомпонентные короткопериодные велосиметры, выполненные на основе геофонов HS-1 производства OYO Геоспасе. Эти датчики имеют частоту среза 2 Гц. Три геофона расположены ортогонально в герметически упакованном алюминиевом корпусе, позволяющем установку в неглубокие скважины или напрямую на грунт [22]. Сейсмические сигналы записываются с помощью регистраторов «Ермак-5» [23, 24]. «Ермак-5» — это шестиканальный регистратор, который обеспечивает синхронизацию с точным временем GPS. Данные хранятся в формате miniSeed, а их обмен осуществляется по протоколу SeedLink. Передача данных от точек сейсмического мониторинга осуществляется с помощью интернет-каналов сотовой связи через 4G-роутер iRZ RU01.

Для того чтобы обеспечить бесперебойное питание, каждая сейсмическая станция оснащена дополнительным источником питания, в основе которого работает гелиевый аккумулятор емкостью 100 А·ч. Этот объем позволяет станции работать на протяжении 6 дней в случае аварийного отключения основного источника питания. На этапе проектирования сети мониторинга приоритет был отдан оптимальному расположению станций относительно области мониторинга. Поэтому четыре сейсмические станции были расположены в области, где было недоступно подключение к существующим сетям электропитания, а прокладка кабельных линий стоила относительно дорого. Для того чтобы обеспечить электроэнергией эти четыре станции, вблизи них были установлены два ветрогенератора Rutland FM910-4 (рис. 2, б). Каждый из них имеет максимальную мощность 155 Вт, что в паре с высокоемкими батареями обеспечивает непрерывное

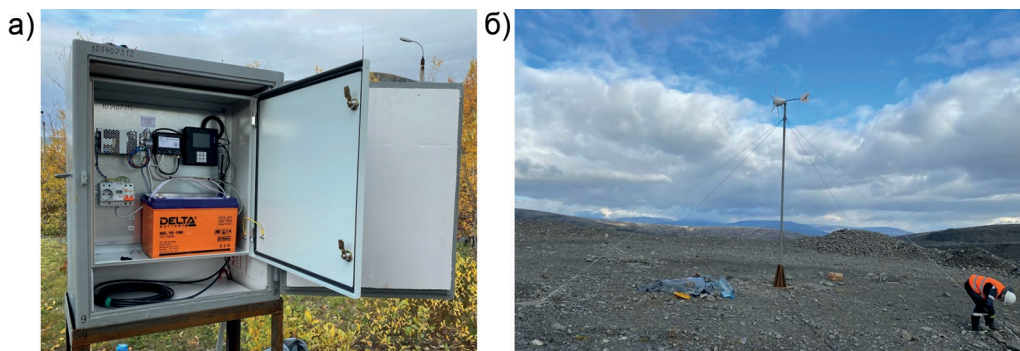


Рис. 2. Оборудование сети сейсмического мониторинга на Восточном руднике КФ АО «Апатит»: сейф для оборудования сбора, передачи данных и бесперебойного питания (а); ветрогенератор (б)

Fig. 2. Equipment of the seismic monitoring network of the Vostochny mine of the KB JSC «Apatit»: a safe for the collection, transmission and backup power system (a); wind turbine (b)

электропитание для этих сейсмических станций. Кроме того, при выборе этих ветрогенераторов для установки в горной местности была учтена их важная характеристика — способность противостоять перегрузкам из-за сильного ветра (более 15 м/с).

Для установки сейсмометров в выбранных точках были пробурены скважины 2—3 м глубиной, а сами сейсмометры при установке зацементированы в основание скважин. Это позволило установить сейсмометры в каменной

почве. Оборудование сбора, передачи данных и бесперебойного питания было установлено в пылевлагозащитные шкафы внутри стальных сейфов, обеспечивающих необходимую защиту оборудования на территории действующего рудника (рис. 2, а).

Система сбора и обработки данных

На рис. 3 приведена упрощенная схема получения и обработки данных сейсмической сети ACCM BP.

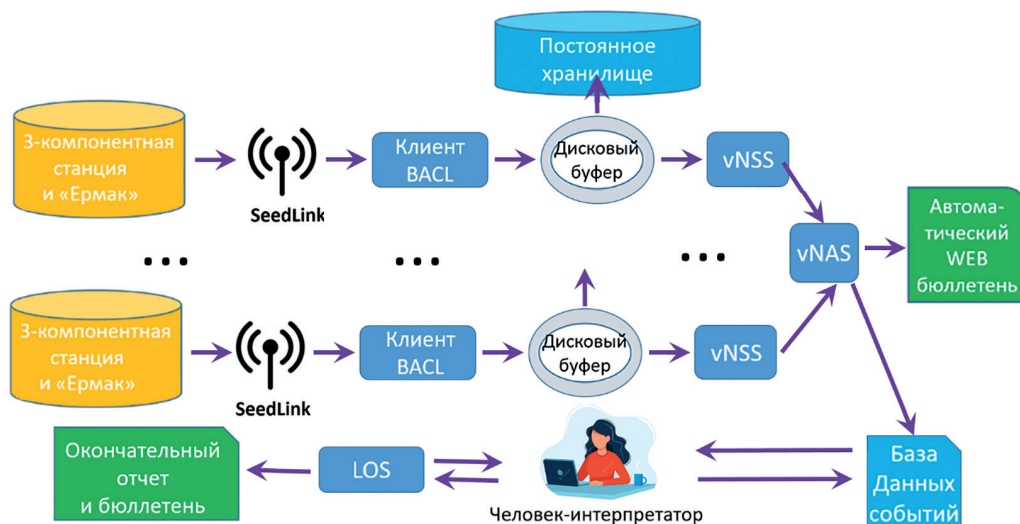


Рис. 3. Схема процесса получения и обработки данных сейсмической сети ACCM BP

Fig. 3. The simplified scheme of data acquisition and processing of the ASSM seismic network

Регистраторы «Ермак» получают первичные данные со станций АССМ. Микропрошивка («микрокод») регистраторов поддерживает протокол SeedLink, наиболее популярный для передачи сейсмических данных [23].

Несколько клиентов SeedLink BACL установлены в центре обработки данных в Апатитах. Клиенты получают данные от регистраторов и помещают их в кольцевой буфер для дальнейшей обработки. Кольцевой буфер содержит в себе непрерывные данные за последнюю неделю. По прошествии недели старые данные заменяются на новые.

Данные, записанные в кольцевой буфер, копируются в постоянное хранилище данных и обрабатываются программным комплексом обнаружения и локации сейсмических событий. Программный комплекс включает две программы. Первая, называемая vNSS, обрабатывает данные с одиночных станций и находит фрагменты записей, возможно, содержащих сейсмические события (детальное описание алгоритма находится в следующем разделе). Таким образом, одновременно работает несколько копий программы vNSS, число которых соответствует количеству станций.

Вторая программа, vNAS, использует результаты работы этих копий vNSS и производит первичную локацию сейсмических событий. Она создает ежедневные отчеты автоматической обработки в форме web-бюллетеня. Она также сохраняет фрагменты записей, соответствующих обнаруженным сейсмическим событиям, в виде файлов формата CSS 3.0.

Поскольку автоматическая обработка данных неизбежно приводит к ложным срабатываниям и ошибкам, необходимо ручное подтверждение результатов. Программа интерактивной обработки сейсмических данных LOS [25] используется для проверки данных, ручного

переопределения локации полученных сейсмических событий и формирования финальных отчетов.

Алгоритмы автоматической обработки данных

В АССМ ВР используется программа vNSS для обработки сигнала с одной трехкомпонентной станции для поиска на ней информативных фрагментов, которые, возможно, являются сейсмическим событием.

Характерными особенностями записей со станций являются отсутствие ярко выраженной линейной поляризации в записях P -волн и большое количество техногенных шумов, мешающих регистрации истинных сейсмических событий. Поэтому обнаружение сейсмических событий в программе основано на анализе простых свойств огибающих записи, аналогичном описанному в [26].

Работа программы vNSS в целом соответствует схеме, описанной в [15], которую авторы применили, когда объединяли сейсмические сети Кольского филиала геофизической службы и КФ АО «Апатит».

Сначала исходная запись фильтруется (используется полосовой фильтр 20 – 100 Гц). Для трехкомпонентного сигнала (далее компоненты сигнала обозначим как $x_i, y_i, z_i, i = 1, \dots, N$, где N – число отсчетов в анализируемом фрагменте, единицы измерений произвольные) рассчитывается амплитудная огибающая – последовательность положительных значений A_i :

$$A_i = \frac{1}{k} \sum_{j=jk}^{jk+k-1} \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + z_j^2}, \quad (1)$$

где k – ширина окна усреднения амплитуды. В настоящей версии программы данные обрабатываются с шагом 0,005 с, а усреднение проводится с шириной $k = 5$, то есть огибающая высчитывается с шагом 0,025 с.

Для детектирования используется обычный алгоритм обнаружения сигнала STA/LTA [27], детектирование производится по огибающей. Длина окна STA составляет 0,25 с, а LTA 0,4 с. Порог равен 3.

Как упоминалось выше, записи характеризуются высоким уровнем техногенного шума. Таким образом, результатов алгоритма STA/LTA недостаточно для надежного поиска сигналов, порожденных реальными сейсмическими событиями. Поэтому была введена концепция «сущности» или «базового интервала», под которыми мы понимаем связный фрагмент огибающей, на котором амплитуда существенно превышает уровень шума и который, вероятно, соответствует реальному сейсмическому событию.

Для того чтобы найти базовые интервалы, мы оцениваем уровень шума как наименьшее скользящее среднее огибающей по всем интервалам с заданной длиной L (40 интервалов длиной по 1 с для текущей версии):

$$S = \min_{i=1, N-L} \left(\frac{1}{L} \cdot \sum_{j=1}^L A_{i+j} \right). \quad (2)$$

Возьмем некоторое число $m > 1$, которое назовем порогом идентификации сейсмосигнала. Последовательность отсчетов огибающей A между числами n_1 и n_2 , такая, что для любого $i \in [n_1, n_2]$ выполняется условие $A_i \geq m \cdot S$, будем называть «первичным интервалом» и обозначать $[n_1, n_2]$.

Первичные интервалы $[x_1, x_2]$ и $[y_1, y_2]$ объединяются, если расстояние между ними не более чем $1/10$ длины одного из этих интервалов. Полученные в результате объединения интервалы будут обозначаться как базовые интервалы или сущности.

На рис. 4 красная часть линии состоит из нескольких интервалов, расстояние между которым мало.

Следовательно, в результате объединения они формируют один базовый интервал.



серая линия — исходный сигнал; линия, показанная красным и синим цветами — огибающая сигнала;
 красная — часть линии, принадлежащая базовому интервалу;
 зеленая горизонтальная линия обозначает уровень шума огибающей (S);
 красная горизонтальная линия — это уровень, часть огибающей выше которого принимается за базовый интервал ($m \cdot S$); красные фрагменты огибающей формируют множество первичных интервалов, составляющих базовый интервал;
 черная вертикальная линия обозначает центр масс базового интервала

Рис. 4. Сигнал, огибающая, уровень шума и базовый интервал (сущность)

Fig. 4. Signal, envelope, noise level and base interval (essence)

Смысл базовых интервалов в том, что, отстраивая их, программа пытается обозначить фрагменты, содержащие записи сейсмических событий. В реальных записях в большинстве случаев одному базовому интервалу соответствует запись не более одного сейсмического события. Исключения составляют двойные события (события, произошедшие с небольшой разницей во времени) и записи шумов.

В случае двойных событий сигнал от первого события не успевает затухнуть к моменту прихода P -волны от второго, поэтому для программы их базовые интервалы «сливаются» в один. Для разделения интервалов используется простой прием: если внутри интервала обнаруживается фаза с достаточно большим отношением STA/LTA , она считается началом нового интервала, то есть интервал разбивается на два.

Если базовый интервал содержит сейсмическое событие, то, как правило, перед его началом имеется одна фаза (приход P -волны). Фаза S -волны, если она есть, находится в пределах интервала.

Наличие S -фазы очень важно для оценки расстояния от датчика до события, но алгоритм STA/LTA не всегда может ее обнаружить. Однако для базовых интервалов существует параметр, который всегда можно вычислить и который можно использовать для оценки расстояния вместо фазы S . Это центр масс фрагмента оболочки на базовом интервале.

Мы заметили, что в большинстве случаев центры масс располагаются позже моментов прихода S -волны (см. рис. 4). Таким образом, была выведена эмпирическая формула, позволяющая грубо оценить время прихода S -волны по времени прихода P -волны и центру масс обгибающей:

$$T_S \approx T_S^* = T_P + \frac{1}{3}(T_{CM} - T_P), \quad (3)$$

где T_P — это момент времени прихода P -волны; T_{CM} — время центра масс на базовом интервале. Таким образом, оценки T_S^* могут быть использованы в процедурах локации вместо истинных приходов S -волн.

Если среди обнаруженных фаз есть фазы в интервале $\left[\frac{(T_P + T_S^*)}{2}, T_{CM} \right]$, эти

фазы являются кандидатами на рассмотрение в качестве реальных вступлений S -волны. Из них в качестве прихода S выбираются те фазы, время которых наиболее близко к T_S^* .

Программа также оценивает веса вступлений S -волн. Если вступление оценивалось только по положению центра масс, его вес принимается меньшим (0,1), в противном случае программа увеличивает его до 0,2.

Программа выбирает интервалы, длина которых находится в заданных пределах (0,5–10 с). Более короткие интервалы, как правило, соответствуют импульсным шумам, более длинные — либо отдаленным событиям, либо техногенным шумам. Другим необходимым условием выбора интервала является наличие максимума STA/LTA в начале интервала, который программа интерпретирует как приход P -волны. Информация о таких интервалах (время прихода P -волны, расчетное время прихода S -волны и вес) передается в программу ассоциации vNAS. Программа vNAS связывает данные (интервалы с оценками времени вступления P и S), полученные от копий vNSS, производит оценку местоположения и магнитуды сейсмического события. Особенность системы ACCM заключается в том, что датчики расположены на небольших расстояниях друг от друга, а сама система предназначена для локализации только близких к ней сейсмических событий. Это позволяет упростить процесс ассоциации.

На первом этапе программа объединяет интервалы, полученные из копий vNSS, формируя общий поток, в котором интервалы располагаются в порядке возрастания оценок времени прихода P -волн.

Затем программа выбирает множества последовательных интервалов In_1 , In_2 такие, что

$$t_{P,n2} - t_{P,n1} < dt_{\max} + dt_{\text{res}},$$

где dt_{\max} — максимальное время прохождения P -волны между датчиками системы; dt_{res} — небольшой запас времени, предназначенный для компенсации возможных неточностей скоростной модели, которая используется для локации. Каждое такое множество может соответствовать сейсмическому событию.

Далее каждое полученное множество интервалов проверяется на совместимость. Два интервала In_1 и In_2 считаются несовместимыми, если:

- они получены для одного и того же датчика;
- $\left| t_{P,1} - t_{P,2} \right| > \frac{d}{V_P} + dt_{\text{res}},$

где d — расстояние между станциями, для которых были определены интервалы; V_P — скорость P -волны. Те интервалы, которые несовместимы с остальными, удаляются из набора.

Когда множество интервалов сформировано, программа выполняет локацию сейсмического события, используя оценки времен вступления P - и S -волн из интервалов.

Для точки с координатами (φ, λ) на поверхности Земли мы вычисляем время в очаге как

$$t_{P,i}^0 = t_{P,i} - \text{dist}(\varphi, \lambda, \varphi_i, \lambda_i) / V_P,$$

$$t_{S,i}^0 = t_{S,i} - \text{dist}(\varphi, \lambda, \varphi_i, \lambda_i) / V_S,$$

где (φ_i, λ_i) — координаты (широта и долгота) i -й станции; dist — расстояние между двумя точками; V_P и V_S — скорости P - и S -волн (поскольку расстояния

между станциями и событиями малы, в программе используются постоянные средние скорости).

Итоговая оценка времени в очаге оценивается как

$$t_0(\varphi, \lambda) = \frac{\sum_i w_{P,i} \cdot t_{P,i}^0 + \sum_i w_{S,i} \cdot t_{S,i}^0}{\sum_i w_{P,i} + w_{S,i}}$$

со стандартным отклонением

$$\sigma(\varphi, \lambda) = \sqrt{\frac{\sum_i w_{P,i} \cdot (t_0 - t_{P,i}^0)^2 + \sum_i w_{S,i} \cdot (t_0 - t_{S,i}^0)^2}{\sum_i w_{P,i} + \sum_i w_{S,i}}},$$

где $w_{P,i}$ — веса, присвоенные оценкам времен вступлений P -волн; $w_{S,i}$ — веса времен S -волн. Веса S намного меньше, чем P , потому что времена S определены с гораздо меньшей точностью.

Функция $\sigma(\varphi, \lambda)$ минимизируется методом спуска. Он может иметь дополнительные минимумы, поэтому метод спуска применяется, начиная с нескольких исходных точек.

Проверка результатов

Информация об обнаруженных и предварительно локализованных системой событиях сохраняется в базе данных. База данных содержит волновые формы событий (формат CSS 3.0), а также их координаты, магнитуды и времена прихода на станции продольных и поперечных волн.

Результаты локации любого события из базы данных могут быть проверены и пересчитаны в случае необходимости. Для этого используется программа для интерактивного анализа и локации LOS [15].

Интерпретатор может изменить P - и S -вступления, определенные автоматической системой, и пересчитать координаты события, используя несколько различных методов:

- минимизация оценки времени в очаге, метод, аналогичный приведенному выше;

- метод засечек;
- поиск по сетке;
- локация на стохастическом графе.

Для локации сейсмических событий важно использовать адекватную модель скоростей P и S . Автоматическая система использует постоянные скорости $V_p = 5,7$ км/с и $V_s = 3,2$ км/с, поскольку расстояния между датчиками и событиями относительно малы. Эти значения получены при изучении скоростной структуры Хибинского массива [28].

Однако для ручной локации событий иногда оказывается необходимым использовать данные более удаленных станций. Кроме того, необходимо учитывать рельеф и пустоты в проводящей среде.

Ранее в Кольском филиале была разработана одномерная скоростная модель BARENTS для локации событий на региональных расстояниях в нашем регионе [13]. Мы немного модифицировали модель BARENTS, добавив тонкий поверхностный слой со скоростями, типич-

Модифицированная скоростная модель BARENTS

The modified BARENTS velocity model

Верхняя граница слоя, км	V_p , км/с	V_s , км/с
0	5,7	3,2
1	6,2	3,58
16	6,7	3,87
40	8,1	4,6
55	8,23	4,68

ными для Хибинского массива (таблица). Для учета рельефа и пустот в проводящей среде оказалась очень удобной локация сейсмических событий в проводящей среде, приближенной стохастическим графом.

В 2013 г. в Кольском филиале Геофизической службы РАН была разработана программа «Сейсмический конфигуратор» (СК) [29]. Она позволяет пользователю задавать сейсмические скоростные модели как комбинации горизонтальных слоев и трехмерных тел. Идея программы заключается в том, что сейсмическая среда заменяется стоха-

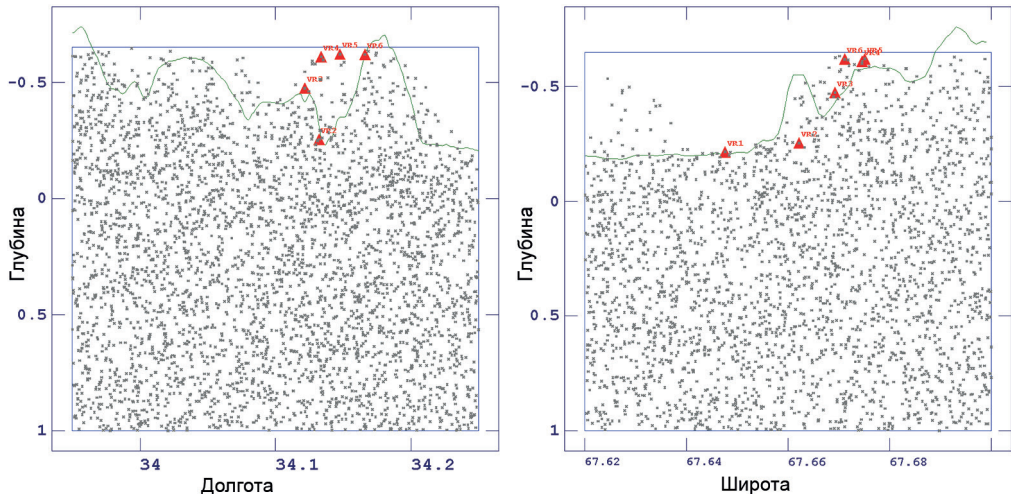


Рис. 5. Пример стохастического графа, используемого для локации в системе АССМ ВР. Сейсмические станции отмечены треугольниками. На рисунке показаны разрезы по широте и долготе

Fig. 5. Example of random graph used for the location in ASSM system. Seismic stations are marked with red triangles. The figure shows sections in latitude and longitude

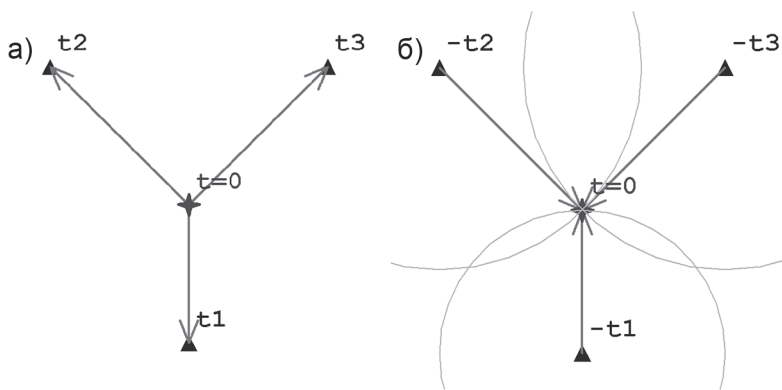


Рис. 6. Принцип инверсии времен для сейсмической локации: в источнике в момент времени $t = 0$ произошло событие, волна пришла на станции в моменты времени t_1, t_2, t_3 (а); волны, выпущенные из приемников в моменты $-t_1, -t_2, -t_3$, сходятся в источнике в момент времени в $t = 0$ (б)

Fig. 6. Inversion principle of seismic location: an event occurred in the source at time $t = 0$, the wave arrived at the stations at time t_1, t_2, t_3 (a); waves emitted from the receivers at the moments $-t_1, -t_2, -t_3$ converge in the source at the moment of time $t = 0$ (b)

стическим графом, состоящим из большого количества вершин и ребер (связей между вершинами). Время прохождения сейсмических волн вычисляется для каждого ребра (звена), а сейсмическая волна, распространяющаяся в среде, моделируется траекторией на графе.

Стохастический граф задается двумя распределенными по земле функциями: плотностью вершин и максимальным расстоянием для установления связи между вершинами (рис. 5).

Локация сейсмического события может быть легко выполнена, используя принцип инверсии (рис. 6).

Предположим, что в момент времени $t = 0$ произошло сейсмическое событие и мы зафиксировали приход сейсмической волны на i -ю станцию в моменты времени t_i (рис. 6, а). Если мысленно поменять местами знаки приходов t_i и излучать волны от станций в моменты времени $-t_i$, то все волны пересекутся в момент времени $t = 0$ в точке, где произошло событие (рис. 6, б).

В нашей аппроксимации стохастическим графом эта инверсия реализуется многократным вызовом алгоритма Дейкстры [30], который может найти кратчай-

шие пути от одной заданной вершины ко всем остальным одновременно и, таким образом, аналогичен излучению волны.

Стохастический граф для Восточного рудника был построен с помощью программы СК (см. рис. 5). Он содержит около 80 000 вершин на глубинах от $-0,6$ до 1 км и 35 000 000 ребер.

Алгоритм локации при помощи стохастического графа был реализован в программе LOS и используется в самых сложных случаях.

Выводы

Таким образом, на территории Восточного рудника КФ АО «Апатит» была создана система детального сейсмического мониторинга, которая работает в автоматическом режиме и оперативно предоставляет информацию о геодинамических процессах на контролируемой территории. Применяются новые подходы и методы автоматической локации сейсмических событий в трехмерной среде с учетом природного и техногенного рельефа. Это позволило добиться высокой точности определения координат гипоцентра и обеспечить низкий порог магнитуды.

В течение всего периода наблюдений АССМ ВР с конца 2020 г. до середины 2022 г. были зарегистрированы тысячи событий в области мониторинга в диапазоне локальных магнитуд ML от –1 до 3,7.

Сильнейшее землетрясение, произошедшее 5 марта 2022 г., вызвало серию афтершоков из более чем 250 событий. Геометрия расположения очагов афтершоков позволила выявить и картировать активизировавшуюся структуру, расположенную в пределах Ньюоркпахкского карьера. Кроме того, низкий магнитудный порог регистрации АССМ ВР позволяет оперативно выделять зоны активизации микросейсмичности, связанные, в том числе, с периодами активного снеготаяния и, как следствие, повышенной обводненности горного массива.

Результаты текущего сейсмического мониторинга с использованием АССМ ВР позволят оперативно и более точно управлять геодинамическими рисками при проведении горных работ на карьере рудника Восточный, а также планировать разработку карьера с учетом

выявленных геодинамически активных структур.

Авторы выражают глубокую благодарность Корчаку Павлу Анатольевичу – начальнику отдела развития горно-геологических информационных систем КФ АО «Апатит» и Моторину Александру Юрьевичу – ведущему инженеру-геофизику КФ АО «Апатит» за огромный вклад в планирование и реализацию проекта создания АССМ ВР, предложения по техническим решениям и сопровождение предпроектных и проектных работ, а также за их постоянное участие во взаимодействии между КоФ ФИЦ ЕГС РАН и КФ АО «Апатит» в части сейсмологического мониторинга.

Данные, использованные в работе, получены на крупномасштабной исследовательской установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс для мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга РФ, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пожиленко В. И., Гавриленко Б. В., Жиров Д. В., Жабин С. В. Геология рудных районов Мурманской области. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002. – 359 с.

2. Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н. Геомеханические исследования и обоснования при ведении горных работ на Кольском полуострове / Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. – Апатиты: КНЦ РАН, 2005. – С. 122–132.

3. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. – Л.: Наука, 1977. – 213 с.

4. Семенова И. Э. Исследование трансформации напряженно-деформированного состояния Хибинской апатитовой дуги в процессе крупномасштабной выемки полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 300–313.

5. Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н., Козырев С. А., Мальцев В. А., Рыбин В. В., Тимофеев В. В., Федотова Ю. В., Паничкин С. А., Каспарьян Э. В., Ловчиков А. В., Кузьмин И. А., Енютин А. Н., Семенова И. Э., Завьялов А. Д., Смирнов В. Б., Свиинин В. С., Аккуратов М. В. Сейсмичность при горных работах. – Апатиты: КНЦ РАН, 2002. – 325 с.

6. Козырев А. А., Аккуратов М. В., Федотова Ю. В., Жукова С. А. Влияние обводненности пород на сейсмичность / Комплексные геолого-геофизические модели древних щитов

тов: Труды Всероссийской (с международным участием) научной конференции. — Апатиты: ГИ КНЦ РАН, 2009. — С. 243 — 247.

7. Козырев А. А., Федотова Ю. В., Аккуратов М. В., Жукова С. А. Взаимосвязь обводненности пород и сейсмичности в зоне стыковки подземного рудника и карьера / Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. — Апатиты: ООО «Реноме», 2011. — С. 385 — 390.

8. Zhukova S., Korchak P., Streshnev A., Salnikov I. Geodynamic rock condition, mine workings stabilization during pillar recovery at the level +320 m of the Yukspor deposit of the Khibiny / Problems of Complex Development of Georesources. VII International Scientific Conference. 2018, vol. 56. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602022.

9. Журавлева О. Г. Кластеризация сейсмических событий в условиях удароопасных месторождений Хибинского массива // Проблемы недропользования. — 2017. — № 1(12). — С. 14 — 20. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.014.

10. Аккуратов М. В. Сейсмический мониторинг на рудниках ОАО «Апатит» / Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. — Апатиты: ООО «Реноме», 2011. — С. 374 — 379.

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. — С. 42 — 46.

12. Fedorov A. V., Asming V. E., Jevtjugina Z. A., Prokudina A. V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic // Seismic Instruments. 2019, vol. 55, pp. 17 — 23. DOI: 10.3103/S0747923919010067.

13. Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic location calibration of the European Arctic // Pure and Applied Geophysics. 2001, vol. 158, pp. 117 — 128. DOI: 10.1007/PL0001151.

14. Аккуратов М. В., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А., Корчак П. А. Объединенная система контроля состояния Хибинского горного массива на базе сетей сейсмических станций Кольского филиала ГС РАН и ОАО «Апатит» / Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. — Апатиты: ФГБУН ГС РАН, 2011. — С. 7 — 10.

15. Asming V. E., Fedorov A. V., Korchak P. A., Motorin A. Yu. LORS2 software package for monitoring the seismicity of the Khibiny massif: Construction principles and basic algorithms // Seismic Instruments. 2021, vol. 57, pp. 27 — 37. DOI: 10.3103/S0747923921010059.

16. Kortström J., Uski M., Tiira T. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network // Computers & Geosciences. 2016, vol. 87, pp. 22 — 30. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.11.006.

17. Tiira T., Uski M., Kortström J., Kaisko O., Korja A. Local seismic network for monitoring of a potential nuclear power plant area // Journal of Seismology. 2016, vol. 20, pp. 397 — 417. DOI: 10.1007/s10950-015-9534-8.

18. Шулаков Д. Ю., Бутырин П. Г., Верхоланцев А. В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горный журнал. — 2018. — № 6. — С. 25 — 29. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05.

19. Verkholtantsev A. V., Dyagilev R. A., Shulakov D. Y., Shkurko A. V. Monitoring of earthquake loads from blasting in the shakhtau open pit mine // Journal of Mining Science. 2019, vol. 55, pp. 229 — 238. DOI: 10.1134/S1062739119025503.

20. Verkholtantsev A. V., Verkholtantsev P. G. Complex technique of assessment of seismic effects of blasting // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 2018. 2018, vol. 18, no. 1.1, pp. 715 — 722. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S05.090.

21. Verkholantsev A. V., Tsvetkov R. V., Muriskina A. S., Pyatkov D. S. Deformation and seismic monitoring of a residential building located in the subsidence zone above mining // *Seismic Instruments*. 2021, vol. 57, pp. 730 – 741. DOI: 10.3103/S0747923921060074.

22. Шулаков Д. Ю., Верховоланцев Ф. Г., Зверева А. С. Технология детального сейсмологического мониторинга на примере наблюдений в зоне Краснослободского разлома Старобинского месторождения калийных солей / *Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я научно-практическая конференция совместно с семинаром «Инженерная и рудная геология 2020»*. – Пермь: ООО «ЕАГЕ Геомодель», 2020. – С. 41. DOI: 10.3997/2214-4609.202051057.

23. Butyrin P. G., Verkholantsev F. G., Verkholantsev A. V., Shulakov D. Y. Digital Seismic Logger «Ermak-5». Experience of Development and Implementation // *Seismic Instruments*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 117 – 128. DOI: 10.3103/S0747923919020051.

24. Butyrin P., Shulakov D., Verkholantsev P., Verkholantsev A., Kichigin M. Seismic recorder «Ermak-5» as the part of the system of seismological monitoring of Verkhnekamskoe potash deposit // 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 2018. 2018, vol. 18, no. 1.1, pp. 963 – 970. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S05.120.

25. Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // *Российский сейсмологический журнал*. – 2021. – Т. 3. – № 1. – С. 27 – 40. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.02.

26. Jin P., Zhang C., Shen X., Wang H., Pan C., Lu N., Xu X. A novel technique for automatic seismic data processing using both integral and local feature of seismograms // *Earthquake Science*. 2014, vol. 27, no. 3, pp. 337 – 349. DOI: 10.1007/s11589-014-0084-x.

27. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1998, vol. 88, no. 1, pp. 95 – 106. DOI: 10.1785/BSSA0880010095.

28. Vinogradov Yu., Kozyrev A., Asming V. New 3D velocity model of the Khibiny and Lovzero mountain massifs for accurate location of rock bursts and explosions in underground mines and quarries // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. Albena, Bulgaria. 2015, pp. 1051 – 1058. DOI: 10.5593/SGEM2015/B13/S5.136.

29. Асминг В. Э., Виноградов Ю. А., Прокудина А. В. Моделирование сейсмической локации в трехмерных средах // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. – 2013. – Т. 16. – № 4. – С. 644 – 649.

30. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische Mathematik*. 1959, vol. 1, pp. 269 – 271. **МІАБ**

REFERENCES

1. Pozhilenko V. I., Gavrilenko B. V., Zhirov D. V., Zhabin S. V. *Geologiya rudnykh rayonov Murmanskoy oblasti* [Geology of ore districts of the Murmansk region], Apatity, KNTS RAN, 2002, 359 p.

2. Kozyrev A. A., Panin V. I., Savchenko S. N. Geomechanical studies and justifications in the conduct of mining operations on the Kola Peninsula. *Formirovanie osnov sovremennoy strategii prirodopol'zovaniya v Evro-Arkticheskom regione* [Formation of the foundations of a modern strategy for nature management in the Euro-Arctic region], Apatity, KNTS RAN, 2005, pp. 122 – 132.

3. Markov G. A. *Tektonicheskie napryazheniya i gornoe davlenie v rudnikakh Khibinskogo massiva* [Tectonic stresses and rock pressure in the mines of the Khibiny massif], Leningrad, Nauka, 1977, 213 p.

4. Semenova I. E. Investigation of the transformation of the stress-strain state of the Khibiny apatite arc in the process of large-scale mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 4, pp. 300 – 313. [In Russ].

5. Kozyrev A. A., Panin V. I., Savchenko S. N., Kozyrev S. A., Mal'tsev V. A., Rybin V. V., Timofeev V. V., Fedotova Yu. V., Panichkin S. A., Kaspar'yan E. V., Lovchikov A. V., Kuz'min I. A., Enyutin A. N., Semenova I. E., Zav'yalov A. D., Smirnov V. B., Svinin V. S., Akkuratov M. V. *Sey-smichnost' pri gornykh rabotakh* [Seismic activity during mining works], Apatity, KNTS RAN, 2002, 325 p.

6. Kozyrev A. A., Akkuratov M. V., Fedotova Yu. V., Zhukova S. A. Influence of rock watering on seismicity. *Kompleksnye geologo-geofizicheskie modeli drevnikh shchitov: Trudy Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchnoy konferentsii* [Complex geological and geophysical models of ancient shields. Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific conference], Apatity, GI KNTS RAN, 2009, pp. 243 – 247. [In Russ].

7. Kozyrev A. A., Fedotova Yu. V., Akkuratov M. V., Zhukova S. A. Interrelation of water cut of rocks and seismicity in the zone of docking of an underground mine and a quarry. *Problemy i tendentsii ratsional'nogo i bezopasnogo osvoeniya georesursov: Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Gornogo instituta KNTS RAN* [Problems and trends of rational and safe development of georesources. Collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Mining Institute of the KSC RAS], Apatity, OOO «Renome», 2011, pp. 385 – 390. [In Russ].

8. Zhukova S., Korchak P., Streshnev A., Salnikov I. Geodynamic rock condition, mine workings stabilization during pillar recovery at the level +320 m of the Yukspor deposit of the Khibiny. *Problems of Complex Development of Georesources. VII International Scientific Conference*. 2018, vol. 56. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602022.

9. Zhuravleva O. G. Clustering of seismic events in conditions of shock-prone deposits of the Khibiny massif. *Problems of Subsoil Use*. 2017, no. 1(12), pp. 14 – 20. [In Russ]. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.01.014.

10. Akkuratov M. V. Seismic monitoring at the mines of JSC «Apatit». *Problemy i tendentsii ratsional'nogo i bezopasnogo osvoeniya georesursov: Sbornik dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 50-letiyu Gornogo instituta KNTS RAN* [Problems and trends of rational and safe development of georesources. Collection of reports of the All-Russian scientific and technical conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Mining Institute of the KSC RAS], Apatity, OOO «Renome», 2011, pp. 374 – 379. [In Russ].

11. Korchak P. A., Zhukova S. A., Men'shikov P. Yu. Formation and development of the monitoring system for seismic processes in the area of production activities of JSC «Apatit». *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 10, pp. 42 – 46. [In Russ].

12. Fedorov A. V., Asming V. E., Jevtjugina Z. A., Prokudina A. V. Automated seismic monitoring system for the European Arctic. *Seismic Instruments*. 2019, vol. 55, pp. 17 – 23. DOI: 10.3103/S0747923919010067.

13. Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic location calibration of the European Arctic. *Pure and Applied Geophysics*. 2001, vol. 158, pp. 117 – 128. DOI: 10.1007/PL00001151.

14. Akkuratov M. V., Asming V. E., Vinogradov Yu. A., Korchak P. A. Unified system for monitoring the state of the Khibiny mountain massif based on networks of seismic stations of the Kola branch of the GS RAS and JSC «Apatit». *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh: Materialy Shestoy Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the Sixth International Seismological School], Apatity, FGBUN GS RAN, 2011, pp. 7 – 10. [In Russ].

15. Asming V. E., Fedorov A. V., Korchak P. A., Motorin A. Yu. LORS2 software package for monitoring the seismicity of the Khibiny massif: Construction principles and basic algorithms. *Seismic Instruments*. 2021, vol. 57, pp. 27 – 37. DOI: 10.3103/S0747923921010059.

16. Kortström J., Uski M., Tiira T. Automatic classification of seismic events within a regional seismograph network. *Computers & Geosciences*. 2016, vol. 87, pp. 22 – 30. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.11.006.
17. Tiira T., Uski M., Kortström J., Kaisko O., Korja A. Local seismic network for monitoring of a potential nuclear power plant area. *Journal of Seismology*. 2016, vol. 20, pp. 397 – 417. DOI: 10.1007/s10950-015-9534-8.
18. Shulakov D. Y., Buturin P. G., Verkholantsev A. V. Seismological monitoring at the Upper Kama potash deposit: objectives, problems, solutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018, no. 6, pp. 25 – 29. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05.
19. Verkholantsev A. V., Dyagilev R. A., Shulakov D. Y., Shkurko A. V. Monitoring of earthquake loads from blasting in the shakhtau open pit mine. *Journal of Mining Science*. 2019, vol. 55, pp. 229 – 238. DOI: 10.1134/S1062739119025503.
20. Verkholantsev A. V., Verkholantsev P. G. Complex technique of assessment of seismic effects of blasting. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 2018*. 2018, vol. 18, no. 1.1, pp. 715 – 722. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S05.090.
21. Verkholantsev A. V., Tsvetkov R. V., Muriskin A. S., Pyatkov D. S. Deformation and seismic monitoring of a residential building located in the subsidence zone above mining. *Seismic Instruments*. 2021, vol. 57, pp. 730 – 741. DOI: 10.3103/S0747923921060074.
22. Shulakov D. Y., Verkholantsev F. G., Zvereva A. S. Detailed seismological monitoring technology based on observations in the Krasnoslobodsky fault zone of the Starobinsk potash deposit. *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2020: 16-ya nauchno-prakticheskaya konferentsiya sovmestno s seminarom «Inzhenernaya i rudnaya geologiya 2020»* [Engineering and Mining Geophysics 2020. 16th Scientific and Practical Conference Together with Seminar «Engineering and Ore Geology 2020»], Perm, OOO «EAGE Geomodel», 2020, pp. 41. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.202051057.
23. Butyrin P. G., Verkholantsev F. G., Verkholantsev A. V., Shulakov D. Y. Digital Seismic Logger «Ermak-5». Experience of Development and Implementation. *Seismic Instruments*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 117 – 128. DOI: 10.3103/S0747923919020051.
24. Butyrin P., Shulakov D., Verkholantsev P., Verkholantsev A., Kichigin M. Seismic recorder «Ermak-5» as the part of the system of seismological monitoring of Verkhnekamskoe potash deposit. *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM 2018*. 2018, vol. 18, no. 1.1, pp. 963 – 970. DOI: 10.5593/sgem2018/1.1/S05.120.
25. Asming V. E., Fedorov A. V., Prokudina A. V. The program for interactive processing of seismic and infrasound records LOS. *The Russian Journal of Seismology*. 2021, vol. 3, no. 1, pp. 27 – 40. [In Russ]. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.02.
26. Jin P., Zhang C., Shen X., Wang H., Pan C., Lu N., Xu X. A novel technique for automatic seismic data processing using both integral and local feature of seismograms. *Earthquake Science*. 2014, vol. 27, no. 3, pp. 337 – 349. DOI: 10.1007/s11589-014-0084-x.
27. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1998, vol. 88, no. 1, pp. 95 – 106. DOI: 10.1785/BSSA0880010095.
28. Vinogradov Yu., Kozyrev A., Asming V. New 3D velocity model of the Khibiny and Lovozero mountain massifs for accurate location of rock bursts and explosions in underground mines and quarries. *15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015*. Albena, Bulgaria. 2015, pp. 1051 – 1058. DOI: 10.5593/SGEM2015/B13/S5.136.
29. Asming V. E., Vinogradov Yu. A., Prokudina A. V. Modeling seismic location in 3D media. *Vestnik MSTU*. 2013, vol. 16, no. 4, pp. 644 – 649. [In Russ].
30. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1959, vol. 1, pp. 269 – 271.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Асминг Владимир Эрнестович*¹ — канд. физ.-мат. наук,
ведущий научный сотрудник,
e-mail: AsmingVE@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3317-2488,
*Федоров Андрей Викторович*¹ — канд. физ.-мат. наук,
директор, e-mail: Afedorov@krsc.ru,
*Федоров Иван Сергеевич*¹ — младший научный сотрудник,
e-mail: IFedorov@krsc.ru,
*Онуприенко Вячеслав Сергеевич*² — главный инженер,
e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2153-8585,
*Стрешнев Анатолий Александрович*² — начальник службы
прогноза и предотвращения горных ударов,
e-mail: astreshnev@phosagro.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0343-4480,
¹ Кольский филиал Федерального исследовательского центра
«Геофизическая служба» РАН (КоФ ФИЦ ЕГС РАН),
² Кировский филиал АО «Апатит».

Для контактов: Федоров А.В., e-mail: Afedorov@krsc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*V.E. Asming*¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Leading Researcher,
e-mail: AsmingVE@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-3317-2488,
*A.V. Fedorov*¹, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Director, e-mail: Afedorov@krsc.ru,
*I.S. Fedorov*¹, Junior Researcher,
e-mail: IFedorov@krsc.ru,
*V.S. Onupriyenko*², Chief Engineer,
e-mail: VOnuprienko@phosagro.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2153-8585,
*A.A. Streshnev*², Head of Rock Bursts
Prediction and Prevention Survey,
e-mail: astreshnev@phosagro.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0343-4480,
¹ Kola branch of Geophysical Survey
of Russian Academy of Sciences,
184209, Apatity, Russia,
² Kirovsk branch of JSC «Apatit»,
184209, Kirovsk, Russia.
Corresponding author: A.V. Fedorov, e-mail: Afedorov@krsc.ru.

Получена редакцией 02.12.2022; получена после рецензии 12.04.2023; принята к печати 10.07.2023.
Received by the editors 02.12.2022; received after the review 12.04.2023; accepted for printing 10.07.2023.

