

УДК 550.34.03

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

Д. Ю. ШУЛАКОВ, зав. лабораторией, канд. техн. наук,
shulakov@mi-perm.ru

П. Г. БУТЫРИН, научный сотрудник, канд. техн. наук

А. В. ВЕРХОЛАНЦЕВ, ведущий инженер

Горный институт УрО РАН – филиал ФГБУН Пермского федерального
исследовательского центра УрО РАН, Пермь, Россия

Введение

При подземной разработке месторождений водорастворимых полезных ископаемых одной из важнейших задач является обеспечение водонепроницаемости пачки пород, расположенной между кровлей верхнего обрабатываемого горизонта и подошвой первого снизу водоносного горизонта, называемой водозащитной толщей (ВЗТ). Необходимость сохранения целостности ВЗТ сильно осложняет разведку и разработку месторождения, так как последние следует осуществлять способами, исключающими проникновение воды в рудник. Нарушение сплошности ВЗТ может привести к тому, что пресные или слабоминерализованные воды начнут поступать в выработки. При этом они будут растворять соляные породы, что, в свою очередь, будет приводить к увеличению числа образовавшихся трещин. Процесс повышения водопритока будет нарастать лавинообразно и приведет к затоплению рудника. Во избежание этого на калийных и соляных рудниках, как правило, используют камерную систему разработки, при которой вышележащая толща пород поддерживается регулярно оставляемыми междукамерными целиками [1].

С целью обеспечения безопасной отработки Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) на всех действующих рудниках ведется режимный мониторинг, включающий в себя геофизические, геомеханические и маркшейдерские наблюдения. Важной частью этого комплекса является система непрерывного сейсмологического мониторинга, позволяющего с высокой оперативностью отслеживать динамику процессов разрушения в горных породах в пределах значительных территорий [2].

Режимные наблюдения в горных выработках

В настоящее время системами сейсмологического мониторинга охвачены все действующие рудники: три в г. Соликамске и два в г. Березники. На каждом из шахтных полей действует от 6 до 12 сейсмопавильонов, однако пространственное распределение их неравномерно и зависит как от горнотехнической обстановки, так и от физической возможности установить регистриру-

Приведены результаты сейсмологических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей. Сейсмомониторинг позволяет осуществлять непрерывные наблюдения за большими территориями, оперативно выявлять потенциально опасные участки и отслеживать активность геодинамических процессов. Показана необходимость переоснащения шахтных мониторинговых систем цифровыми аналогами. Дано описание перспективного комплекса «Ермак», разработанного Горным институтом УрО РАН.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, сейсмический мониторинг, аварийная ситуация, детектирование событий, сейсмический регистратор.

DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05

ющее оборудование. Как следствие, регистрационные возможности сетей также неоднородны: минимальный представительный регистрируемый энергетический класс сейсмических событий составляет от 1,5 (южная часть рудника БКПРУ-2) до 3,7 (рудник БКПРУ-4), погрешность определения координат эпицентров соответственно составляет 30–250 м. На **рис. 1** представлены графики повторяемости сейсмических событий на территории шахтных полей СКРУ-1 и СКРУ-2. По точке перегиба этих графиков можно определить, что для обоих шахтных полей без пропусков регистрируются события, начиная с энергии 1 кДж. В то же время для отдельных участков шахтных полей этот уровень заметно ниже (о чем свидетельствует плавный загиб левой части графиков).

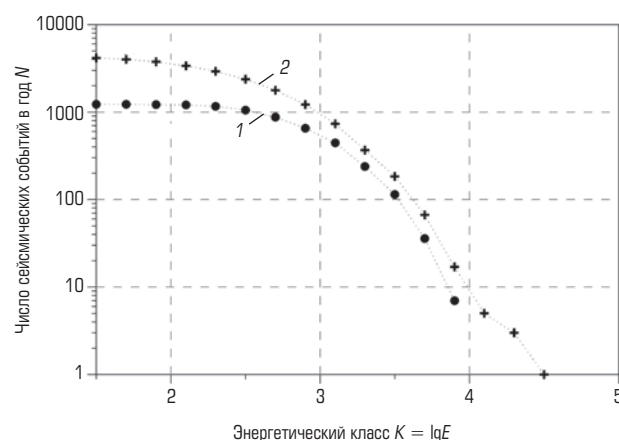


Рис. 1. Кумулятивные графики повторяемости за 2007–2017 гг. для шахтных полей СКРУ-1 (1) и СКРУ-2 (2)

Ежегодно на территории каждого из шахтных полей регистрируется от нескольких десятков до нескольких сотен сейсмических событий, преимущественно связанных с разрушениями несущих элементов горных выработок или вывалами из их кровли. Данные в режиме, близком к реальному времени, поступают в информационно-обрабатывающий центр в г. Перми, где проводится типизация сейсмических событий, определение параметров их очагов, составление каталога и обновление информационного сайта. В случае возникновения крупных сейсмических событий или неблагоприятного развития ситуации осуществляется немедленное оповещение технического руководства рудника. Каталоги сейсмических событий и их производные (такие, как карты плотности выделения сейсмической энергии) активно используются недропользователями при планировании горных работ и определении очередности закладки выработанного пространства.

Необходимо отметить, что используемая мониторинговая система, несмотря на положительный опыт эксплуатации, далека от совершенства. С позиции современных подходов к проведению сейсмологического мониторинга представляется крайне желательным определять не только координаты и энергию произошедших сейсмических событий, но и их механизмы, с целью дальнейшего перехода к непосредственному решению геомеханических задач. Для этого требуются расширение частотного и динамического диапазона используемой аппаратуры, увеличение плотности сети и переход от вертикальных сейсмометров к трехкомпонентным. Подобная модернизация осуществима лишь при условии замены действующей аналоговой аппаратуры на цифровую, и в настоящее время ведутся опытно-методические работы по внедрению цифровых систем сбора данных на рудниках ПАО «Уралкалий». Кроме того, необходимо учитывать, что в результате модернизации систем мониторинга значительно возрастет объем получаемой информации, что потребует повышения степени автоматизации обработки сейсмограмм. В настоящее время в Горном институте УрО РАН разработаны и проходят тестирование помехоустойчивые алгоритмы обработки сейсмограмм [3], пред-

ставляющие собой комбинирование эмпирического модового разложения [4] и детектора Байера–Крадолфера [5]. Данные алгоритмы позволяют в автоматическом режиме выделять и лоцировать слабые сейсмические сигналы на фоне интенсивных нестационарных помех, т.е. в условиях, характерных для горнодобывающих объектов.

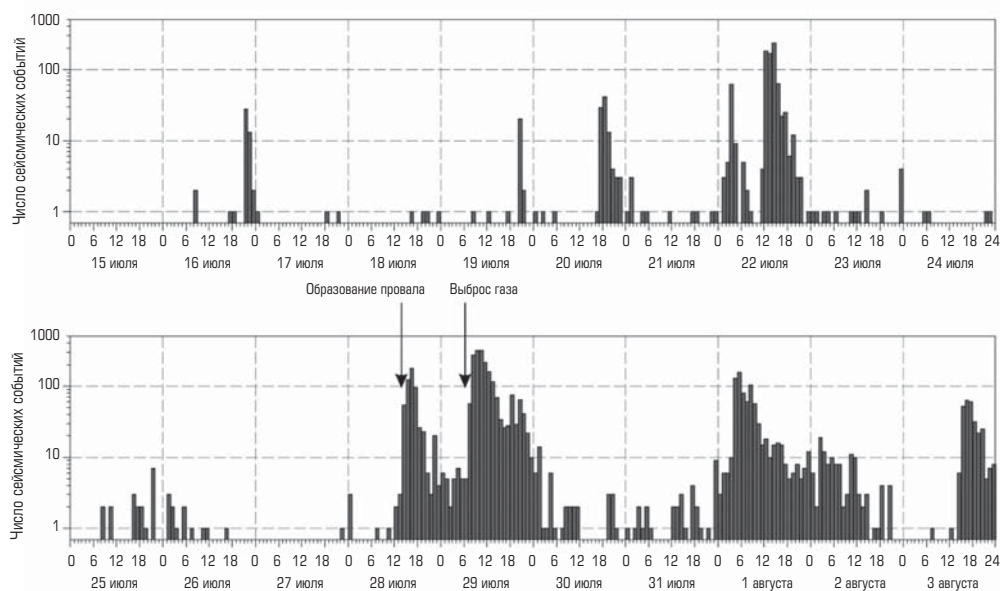
Мониторинг аварийных ситуаций

Возникновение в октябре 2006 г. аварийного водопритока на руднике БКПРУ-1 обусловило постановку новых задач перед системой сейсмологического мониторинга. Было очевидно, что в месте прорыва надсолевой толщи должна образоваться карстовая полость, однако точное место ее возникновения и динамика развития были неизвестны. Регистрационных возможностей шахтной сети для решения этой задачи было явно недостаточно. В течение нескольких месяцев в районе аварийного участка была развернута мониторинговая система, состоящая из восьми сейсмодатчиков, установленных в четырех скважинах глубиной до 50 м, а также шести поверхностных сейсморепродукторов. Информацию о сейсмических событиях в режиме, близком к реальному времени, передавали в информационно-обрабатывающий центр. Результаты сейсмологического мониторинга обрабатывали совместно с другими геофизическими методами. Была достигнута высокая информативность: уже весной 2007 г. расположение эпицентров сейсмических событий позволило оконтурить зону ожидаемого провала.

В течение первого полугодия уровень сейсмической активности был низким, регистрировались лишь отдельные сейсмические события. Однако во второй половине июля 2007 г. ситуация резко изменилась: мониторинговой системой начали регистрироваться интенсивные всплески микросейсмической активности, число событий достигало нескольких десятков в час. Это означало, что формирование карстовой воронки перешло в финальную стадию. В течение последующих дней уровень сейсмической активности волнообразно возрастал, и днем 28 июля на земной поверхности образовалась воронка диаметром 50 м. Через сутки из этой воронки произошел взрывообразный выброс газа. Оба этих процесса сопровождались значительной сейсмической активизацией (см.

рис. 2).

Рис. 2. Динамика микросейсмической активности в районе аварийного участка рудника БКПРУ-1 за период с 15 июля по 3 августа 2007 г.



В последующие дни происходил интенсивный рост воронки, причем каждый раз увеличение ее размеров сопровождалось большим числом сейсмических событий. Анализ пространственной и временной динамики микросейсмической активности позволил спрогнозировать направления развития провала, что было крайне важно, так как вблизи от него проходила железнодорожная ветка.

В дальнейшем эффективность сейсмологического мониторинга была подтверждена при возникновении аварийной ситуации на руднике СКРУ-2. Резкое возрастание сейсмической активности было обнаружено за 2,5 мес до образования провала на земной поверхности, а результаты сейсмологического мониторинга позволили оперативно оконтурить опасную зону. При этом ни другие геофизические методы, ни данные повторного нивелирования не показали наличия какой-либо аномалии на данном участке.

По состоянию на сегодняшний день на территории Верхнекамского месторождения системы локального сейсмического мониторинга установлены на всех аварийных и потенциально опасных участках. Данные с сейсмометров в режиме реального времени поступают в информационно-обрабатывающий центр, где осуществляется их увязка в единую систему, детектирование сейсмических событий и определение их параметров. Результаты в оперативном режиме поступают на пульт городской диспетчерской службы, а также в виде ежедневных и еженедельных сводок передаются ответственным лицам городской администрации и специалистам ПАО «Уралкалий».

Как и в случае с сейсмологическим мониторингом рудников, основные усилия сейчас направлены на повышение уровня автоматизации обработки сейсмических событий (детектирование слабых сигналов, их типизация, определение координат источника и энергии).

Аппаратурное обеспечение наблюдений

Проведение сейсмологических наблюдений на современном уровне предъявляет очень серьезные требования к аппаратному обеспечению. В связи с этим на всех этапах развития системы сейсмологического мониторинга подбор и конфигурирование регистрирующей аппаратуры проводили с максимально возможной тщательностью и всесторонним тестированием используемых программно-аппаратных решений.

С 1995 г. по настоящее время при сейсмологическом мониторинге рудников используют аналоговую телеметрическую систему, основными достоинствами которой являются ремонтпригодность, простота в обслуживании и синхронность. Расширение систем сейсмологического мониторинга происходило за счет увеличения числа сейсмопавильонов и каналов, что привело к созданию в Горном институте УрО РАН специальных кассет для объединения наземных модулей телеметрии. Кассеты предусматривали расширенные средства индикации работы каналов и возможность подачи питания на подземный сейсмопавильон по отдельной линии. На СКРУ-2 использовали аппаратуру частотного уплотнения для передачи сигналов с трех сейсмопавильонов по одной линии для работы малоапертурной группы на северо-вос-

токе рудника СКРУ-2. Подобные решения широко распространены и реализованы в современных телеметрических системах, несмотря на малый динамический диапазон (около 60 дБ) [6].

Возникновение аварийной ситуации на руднике БКПРУ-1 показало, что аналоговые системы передачи сигналов не обеспечивают необходимой разрешающей способности при наблюдении на участках с размерами в первые сотни метров. В связи с этим для решения задач детального мониторинга стали активно использовать аппаратно-программный комплекс компании ISSI (Institute of Mine Seismology, IMS) [7]. В состав комплекса входят: скважинные сейсмические датчики 3G14 и 3G4.5; современные цифровые регистраторы SAQS и GS; беспроводная система передачи данных; программные средства сбора, обработки и интерпретации сейсмических данных. Этот комплекс, специально разработанный для шахтного мониторинга, обеспечивает высокую производительность при оценке сейсмической опасности в режиме реального времени при большом числе сейсмических событий в единицу времени. Кроме того, в нем используется пакетная передача цифровых данных без потерь, в том числе при плохом качестве связи.

Часть задач детального мониторинга решали при помощи мобильного исследовательского сейсмологического комплекса ИСК-3. Использование в его составе мобильного компьютера расширяло возможности оперативного контроля качества регистрируемых сигналов. В процессе полевых экспериментов была определена предельная допустимая длина линий связи от пассивного датчика до регистратора – 500 м. Этот результат был использован при развертывании группы сейсмопавильонов в районе подземного околоствольного двора в шахте рудника БКПРУ-1: линии от датчиков 3G4.5 длиной около 300 м были проложены по стволу и подключены сначала к регистратору ИСК-3, а затем к GS в составе общей системы мониторинга провала на БКПРУ-1.

В процессе затопления рудника БКПРУ-1 появлялись новые потенциально опасные участки, на которых разворачивали системы детального мониторинга. Так, в зоне подработки панелей переходного периода рудника БКПРУ-1 была развернута подсистема производства компании ISSI. Вместе с системой на первом провале рудника БКПРУ-1 они образовали многоканальную высокочувствительную сеть детального мониторинга. Для передачи данных в этих сетях длительное время использовали проводные линии связи и радиомодемы MDS-4710, СПЕКТР-433, работающие на частоте 433 МГц. Сложность рельефа и загруженность радиодиапазона 433 МГц обусловили крайнюю нестабильность передачи данных, поэтому в 2011 г. все радиомодемы были заменены сначала на GSM-модемы, а затем – на 3G-маршрутизаторы MikroTik и iRZ.

В настоящее время потенциально опасная зона в районе ул. Свердлова г. Березники контролируется шестью сейсмическими станциями. Первое время в качестве датчиков использовали велосиметры CM3-KB и регистрирующие комплексы ИСК-4 с 3G-маршрутизаторами iRZ. Применение в составе ИСК-4 одноплатного промышленного компьютера Andantech под управлением операционной системы Windows XP при длительной работе

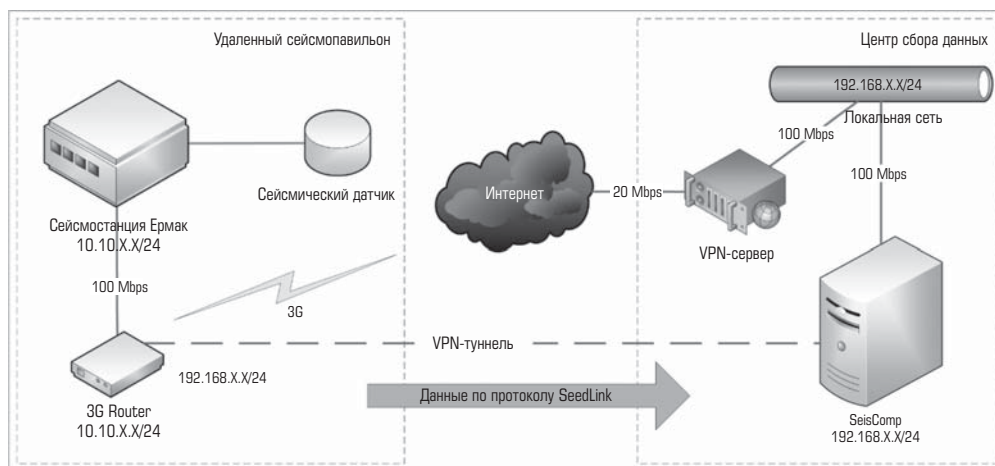


Рис. 3. Схема передачи данных с сейсмического регистратора в информационно-обрабатывающий центр

ки HS-1 как в скважинах, так и на поверхностных сейсморазведках.

С учетом накопленного опыта и расширяющихся по-

казало низкие надежность и точность привязки к единому времени. В связи с этим была выполнена полная замена оборудования, и сегодня подсистема оснащена трехкомпонентными датчиками HS-1 и регистраторами «Ермак-5».

Довольно широкое распространение при мониторинге зон потенциальной опасности получили регистраторы REFTEK 130 (Trimble, США). Высокая надежность, защита от воздействий окружающей среды и точность привязки к единому времени позволяют успешно применять их для решения задач как регионального, так и детального сейсмологического мониторинга. В то же время использование этих приборов требует наличия стабильной связи из-за небольшого размера буфера, в пределах которого возможно восстановление передачи данных при ее обрывах, а в условиях шахты их применение невозможно из-за отсутствия механизма синхронизации времени по сети передачи данных.

В процессе модернизации неоднократно осуществляли замену сейсмических датчиков. В разное время и для различных задач использовались велосиметры СМЗ-КВ, СМЗ-ОС и GS-20DX, акселерометры А1632 (производства РФ), велосиметры GS-1, HS-1 и Sercel L4C-3D (производства США). Российский и зарубежный опыт ведения шахтного мониторинга показывает, что использование акселерометров сокращает охват территории, но делает систему значительно чувствительнее в пределах расстановки датчиков. Кроме того, рассчитанная на основе записей акселерометров сейсмическая энергия может оказаться больше, чем по показаниям велосиметров. Точность локации выше для сети на основе велосиметров. Идеальным решением было бы использование гибридных датчиков либо работа двух систем датчиков параллельно [8], но это приведет к значительному удорожанию мониторинговой системы и усложнению обработки сейсмограмм. В итоге для системы сейсмологического мониторинга ВКМКС были выбраны велосиметры HS-1 с собственной частотой 2 Гц. Высокая повторяемость характеристик, малая чувствительность к отклонениям от горизонтальной и вертикальной осей, а также достаточный частотный диапазон обуславливают эффективное применение этого датчика как в условиях шахтных систем, так и при работе на поверхности. В Горном институте УрО РАН разработаны специальные герметичные алюминиевые корпуса для установ-

требностей при проведении мониторинговых работ на территории ВКМКС уже в 2011 г. было принято решение о разработке собственного регистратора, полностью удовлетворяющего специфике наблюдений на месторождении. Сейсмический регистратор «Ермак-5» разработан в лаборатории природной и техногенной сейсмичности Горного института УрО РАН в 2017 г. [9]. Тогда же началось его тестирование на объектах мониторинга, и в настоящий момент на территории ВКМКС постоянно работают 15 приборов, которые передают данные в центр сбора данных в г. Перми в режиме реального времени через защищенные тоннельные соединения в сети Интернет. Принципиальная схема организации системы сбора информации представлена на рис. 3.

Основные технико-эксплуатационные особенности регистратора «Ермак-5» следующие:

- получение непрерывных данных в режиме реального времени;
- возможность настройки до шести логических сейсмических станций в одном приборе;
- полная реализация протокола SeedLink v.3 с возможностью ретроспективной загрузки данных при обрыве связи;
- доступность в качестве сетевого кольцевого буфера данных всего пространство карты памяти;
- возможность визуального контроля волновых форм и точности синхронизации времени при настройке прибора;
- передача данных и питание по одной линии связи с использованием SHDSL- и PoDSL-технологий;
- синхронизация времени с точностью, превышающей 0,5 мс, по IP-сети (через DSL);
- возможность ретроспективного получения данных по сети или со съемного носителя, в том числе через USB;
- мониторинг состояния регистратора и оперативное управление (сброс, работа с файловой системой) при помощи HTTP-интерфейса;
- бесперебойная работа при низких температурах в условиях Крайнего Севера.

Обзор технических решений, использованных для подобных приборов, показал оптимальность выбранной схематехники и алгоритмизации [10]. При разработке большое внимание уделялось

стабильности хода внутренних часов регистратора и расширению спектра источников синхронизации. Кроме того, был учтен положительный опыт создания высокопроизводительных систем контроля мостов, где задачи синхронизации времени очень значимы [11], а также использование аналитических методов выравнивания времени, помимо прямых измерений и корректировки [12, 13].

Возможность синхронизации времени с использованием протокола NTP в регистраторе «Ермак-5» – необходимое условие для использования прибора в шахте. С декабря 2017 г. на одном из потенциально опасных участков рудника ПАО «Уралкалий» развернута система детального мониторинга, состоящая из пяти вертикальных датчиков HS-1, установленных в стенах горных выработок. Датчики подключены к регистратору «Ермак-5». Прибор соединен с центром сбора данных одной выделенной телефонной линией и передает цифровые данные через SHDSL-мосты. Синхронизация времени на подземном приборе выполняется по протоколу NTP с точностью 150 мкс. Источником точного времени является специализированный NTP-сервер с внешней GPS-антенной. Данное техническое решение показало достаточную эффективность: оно позволило оперативно и с минимальными требованиями к инфраструктуре развернуть высокоразрешающую

систему детального сейсмического мониторинга. Анализ стабильности работы регистратора и качества привязки данных к единому времени свидетельствует об отсутствии каких-либо проблем.

Заключение

Анализируя результаты сейсмологических наблюдений на Верхнекамском месторождении калийных солей за более чем 20-летний период, можно сказать, что сейсмологический мониторинг может быть реализован в качестве высокоинформативного метода. Он позволяет вести непрерывные (как по времени, так и в пространстве) наблюдения за большими территориями, оперативно выявлять потенциально опасные участки и отслеживать активность геодинамических процессов в их пределах. Осуществляемое в настоящее время переоснащение шахтных мониторинговых систем цифровыми системами сбора и передачи данных позволит заметно повысить качество получаемых материалов, а следовательно, и информативность метода.

Библиографический список

См. англ. блок. ☒

«GORNYI ZHURNAL», 2018, № 6, pp. 25–29
DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05

Seismological monitoring at the Upper Kama Potash Deposit: Objectives, problems, solutions

Information about authors

D. Yu. Shulakov¹, Head of Laboratory, Candidate of Engineering Sciences, shulakov@mi-perm.ru

P. G. Butyrin¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

A. V. Verkholantsev¹, Leading Engineer

¹ Mining Institute, Perm Federal Research Center, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

Abstract

The article describes the system of seismological monitoring in the territory of the Upper Kama Potash Deposit. The structure of monitoring networks involved in the integrated observations in all operating mines is presented and their capabilities are assessed. The monitoring data are used to adjust both actual mining and backfill operations. The high efficiency of the detailed seismic monitoring systems in control over accidental and hazardous mine areas is demonstrated. The high-resolution monitoring enables prompt response to adverse processes and prediction of accident development. Hardware and software of monitoring networks deployed in mines and in local areas are presented. It is shown that the modern digital systems of data acquisition and transmission ensure high resolution, sustainable operation and reliable nearly real-time transmission of seismographic records to a data processing center.

Considering the accumulated experience and growing requirements of the Upper Kama Deposit area monitoring, in 2011 it was decided to design a proprietary recorder to be completely meet the specificity of the local observations. Seismic recorder Ermak-5 was designed at the Natural and Induced Seismicity Laboratory of the Mining Institute, UB RAS in 2017.

Have analyzed the seismology data on the Upper Kama Potash Deposit for more than 20 years, it is possible to state that the seismological monitoring is a highly informative method. It allows continuous observations (both in time and space) in vast areas, prompt detection of hazardous sites and tracking of geodynamic activity within their limits. The current reequipment of mine monitoring systems with the digital data acquisition and transmission will noticeably improve quality of recording and, consequently, information content of the method.

Keywords: seismic monitoring, Upper Kama Deposit, accident, event detection, seismic recorder.

References

- Baryakh A. A., Krasnoshtein A. E., Sanfirov I. A. Mining-caused accidents: Berezniki Potash Mine-1 flooding. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra*. 2009. No. 2. pp. 40–49.
- Dyagilev R. A., Shulakov D. Y., Verkholantsev A. V., Glebov S. V. Seismic monitoring in potash mines: observation results and development aspects. *Eurasian Mining*. 2013. No. 2. pp. 24–28.
- Shulakov D. Yu. Algorithm of seismic event detection against the violent noise background. *Modern Seismology Data Processing and Interpretation: XI International Seismology School Transactions*. Obninsk: FITS EGS RAN. 2016. pp. 375–379.
- Huang N. E., Shen S. P. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. 2nd ed. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2014. 400 p.
- Baer M., Kradolfer U. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1987. Vol. 77, No. 4. pp. 1437–1445.
- Anokhin A. G., Kakoshina L. V., Nagovitsin Yu. N., Tyupkin V. M. The 25th anniversary of the Center for Geodynamic Safety, Norilsk Nickel: Initiation, growth, mission. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 6. pp. 23–28. DOI: 10.17580/gzh.2015.06.05
- Mendecki A. J., Lynch R. A., Malovichko D. A. *Routine Seismic Monitoring in Mines*. ISS International Ltd., 2007.
- Rebuli D. B., Goldswain G., Lynch R. A. High quality microseismic monitoring in mines: accelerometers or geophones? *9th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*. Chile, 2017. pp. 23–31.
- Butyrin P. G. From Seisview to Ermak-5: Introduction experience and functional advantages. *Strategies and Processes in Georesources Management: Collection of Scientific Papers*. Perm: GI UrO RAN. 2017. Iss. 15. pp. 201–203.
- Blanco J. R., Menéndez J., Ferrero F. J., Campo J. C., Valledor M. Design of an accurate wireless data logger for vibration analysis with Android interface. *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87(12).
- Wang W. D., Jiang S. F., Zhou H. F. Time synchronization for acceleration measurement data of Jianguyin Bridge subjected to a ship collision. *Structural Control & Health Monitoring*. 2018. Vol. 25, Iss. 1. pp. 1–18.
- Bruscatto L. T., Heimfarth T., de Freitas E. P. Enhancing time synchronization support in wireless sensor networks. *Sensors*. 2017. Vol. 17, Iss. 12. pp. 1–18.
- Butyrin P. G., Kichigin M. V. Features of seismological monitoring development at the Upper Kama Potash Deposit. *Modern Seismology Data Processing and Interpretation: XI International Seismology School Transactions*. Obninsk: FITS EGS RAN. 2016. pp. 71–74.