

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРИ ОТРАБОТКЕ УДАРООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ



Е. Е. РАЗУМОВ^{1,2},
научный сотрудник,
razumov@vniimi.ru



Г. Д. РУКАВИШНИКОВ²,
зав. Центром геодинамического
мониторинга



С. Н. МУЛЕВ²,
директор по науке



С. М. ПРОСТОВ¹,
проф., д-р техн. наук

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

² АО «ВНИМИ», Санкт-Петербург, Россия

Введение

При разработке месторождений одной из актуальных задач является изучение опасных геологических явлений, которые возникают под влиянием различных природных, геологических и техногенных факторов. Обеспечение безопасных условий ведения подземных горных работ является одной из приоритетных задач предприятия. Применение геофизических методов позволяет достаточно быстро оценивать потенциальную опасность геологической среды для горных выработок. Среди геофизических методов, применяемых для исследования проявлений опасных геологических процессов, следует выделить сейсмоакустические исследования, сейсморазведку на поверхностных волнах Рэлея, скважинную, межскважинную, наземную сейсмотомографию и электротомографию и др. [1].

Различные аспекты развития методов сейсмического мониторинга для решения задач подземной геотехнологии рассмотрены в работах целого ряда исследователей [2–8].

Создание многоуровневых систем комплексного геодинамического мониторинга и организация наблюдений позволят выделить региональные и локальные предвестники динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах [9–12].

В качестве представителя многоуровневых систем можно отметить разработанную в ИГД ДВО РАН цифровую геоакустическую систему контроля горного давления (Prognoz ADS), а также

Описаны принципы функционирования и направления развития систем сейсмомониторинга при подземной разработке месторождений. Приведены результаты испытаний одной из подобных систем, разработанной ВНИМИ, в условиях шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь». По результатам испытаний установлены корреляционные связи проявлений сейсмособытий, обладающих максимальной энергией, с приращением относительного критерия, что может служить основанием для локального прогноза геодинамических проявлений горного давления.

Ключевые слова: подземная разработка месторождений, геодинамические явления, горное давление, проявления, локальный прогноз, сейсмомониторинг.

DOI: 10.17580/gzh.2021.01.02

автоматизированную систему акустического контроля состояния массива горных пород САКСМ. Важным элементом системы Prognoz ADS является автоматизированный микросейсмический измерительный комплекс Prognoz S, позволяющий регистрировать сейсмоакустические события с энергией до 10^5 Дж и более в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц. Отличительной особенностью данной системы являются цифровые способы обработки и передачи информации, развитые средства повышения надежности и отказоустойчивости, наличие собственных алгоритмов защиты от техногенных помех [13]. Принцип работы системы САКСМ заключается в сравнении акустического сигнала, источником которого служит воздействие горного оборудования на забой очистной или подготовительной выработки, с параметрами эталонного акустического сигнала, установленного на неопасном участке выработки или на соседних выработках эксплуатируемого пласта [14].

Для локального контроля удароопасности можно выделить программно-аппаратный комплекс с использованием геоакустического метода – прибор Prognoz L, сочетающий в себе современные технические средства и гибкое программное обеспечение. Практическое использование и лабораторные испытания прибора локального контроля показали достаточную точность и адекватность оценки категории удароопасности, соответствующей начальному моменту разрушения для крепких вмещающих пород, а гибкость настройки параметров расчета позволяет проводить корректировку аналитических алгоритмов с учетом особенностей практически любого горного предприятия [15].

Созданная во ВНИМИ система сейсмического мониторинга испытана в условиях СП «Шахта Комсомольская» АО «Воркутауголь» (г. Воркута). Многолетняя эксплуатация региональной системы GITS (Geo Info Trans System) показала, что регистрация событий с малой энергией в районе отработки выемочных столбов требует более густой сети сейсмических датчиков. Для этих целей была построена система из шести сейсморавильонов, монтаж

которых осуществляли в районе ведения очистных работ одной лавы с выполнением технических требований, предъявляемых к оборудованию сейсмопавильонов и бурению контрольных скважин [16].

Целью работы являются обоснование и детализация основных принципов построения системы сейсмического мониторинга при интенсивной отработке угольных пластов.

Методика проведения исследований

Разработанная во ВНИМИ система сейсмического мониторинга GITS предназначена для контроля разрушений в массиве горных пород в пределах одного выемочного столба в угольных шахтах, опасных по газу и пыли. Минимальная энергия регистрируемых сейсмических событий зависит от плотности сети датчиков, частотный диапазон регистрации – от 0,1 до 1000 Гц.

Основные функциональные возможности сейсмологического мониторинга состоят в следующем:

- своевременном выявлении опасных зон на участке контролируемого выемочного столба;
- прогнозировании горных и горнотектонических ударов в соответствии с действующей нормативной базой;
- регистрации всех случаев динамических проявлений горного давления в толще отрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород горного массива в районе контролируемой лавы;
- выявлении провоцирующего влияния природных факторов в их проявлении (например, предшествующих им сейсмических или геодинамических явлений) при расследовании ранее произошедших аварий геодинамической природы;
- автоматическом оповещении персонала шахт и рудников о зарегистрированных сильных сейсмических событиях.

Базовый комплект телеметрии поддерживает шесть датчиков, данное число регистрирующих устройств достаточно для мониторинга зоны отработки выемочного столба. Программное обеспечение системы позволяет сконфигурировать до двух базовых комплектов и обеспечить 12 трехкомпонентных каналов регистрации при необходимости расширения сейсмической локальной сети. Выходной информацией системы локального контроля на базе GITS являются карты сейсмической активности с указанием удароопасных зон (критерии удароопасности устанавливают конкретно для каждой шахты). Записи сейсмических событий сохраняют в базе данных и по мере накопления архивируют.

В состав сейсмического комплекса GITS входят следующие блоки и модули: блоки трехкомпонентных датчиков с предусилителями; выносные модули телеметрии; базовый модуль телеметрии; регистрирующий компьютер; компьютер обработки данных и удаленного управления оборудованием с подключением по сети.

Подземная платформа может быть реализована с установкой датчиков в скважинах и на постаментках.

Основные технические характеристики системы:

- частотный диапазон процессов, воспринимаемых системой, от 0,1 до 1000 Гц;
- диапазон входных сигналов от 0,01 мВ до 2 В;
- динамический диапазон регистрации не менее 120 дБ;
- длина отдельной телеметрической линии связи не более 10 км.

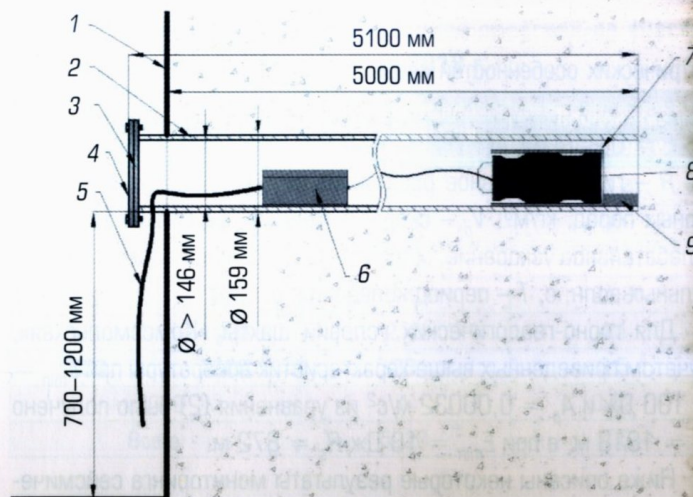


Рис. 1. Схема установки подземного датчика в скважине:

1 – борт выработки; 2 – обсадная труба; 3 – кольцо оголовка; 4 – крышка скважины; 5 – кабельная линия; 6 – выносной модуль GITS; 7 – стакан для установки датчика; 8 – датчик ДРЦ-11; 9 – цементный раствор

В качестве чувствительных элементов в системе используют вибропреобразователи (сейсмоприемники) ДРЦ-11, выполненные на основе трех пар пьезоэлементов, ориентированных взаимно перпендикулярно.

Основные технические характеристики сейсмоприемника:

Отношение боковой чувствительности к осевой	35 дБ
Коэффициент преобразования	$1,0 \pm 6\% \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$
Рабочий частотный диапазон	0,1–1000 Гц
Коэффициент усиления	20 дБ
Неравномерность	АЧХ 10 %
Габаритные размеры:	
диаметр	116×340 мм
масса	9 кг

Схема установки сейсмоприемника ДРЦ-11 в скважине приведена на **рис. 1**.

Результаты

Опытные испытания системы сейсмического мониторинга GITS проведены в условиях шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь».

Основной функциональной характеристикой системы является реальная чувствительность R_s , представляющая собой радиус сферы, в пределах которой данный сейсмический пункт может уверенно зарегистрировать сейсмическое событие определенного энергетического уровня. В общем виде R_s зависит от спектрального состава колебаний в очаге сейсмического события $\Phi(\omega)$ в регистрируемой полосе частот, коэффициента усиления регистрирующей аппаратуры U , амплитуды помех $A_{\text{пом}}$, затухания в среде n , а также от минимальной энергии сейсмического события, которое необходимо зарегистрировать E_{min} :

$$R_s = F[\Phi(\omega), U, A_{\text{пом}}, n, E_{\text{min}}]. \quad (1)$$

Для приближенной оценки величины R_s можно воспользоваться результатами расчета сейсмической энергии события. По оценкам, приведенным в работах по сейсмологии землетрясений и взрывов

[17–19], без учета влияния затухания сейсмического сигнала и геометрических особенностей среды распространения упругих колебаний величина E , Дж, зависит от следующих компонент:

$$E = 0,25R^2\rho V_p A_p^2 \tau_p T^2, \quad (2)$$

где R – гипоцентральное расстояние, м; ρ – средняя плотность горных пород, кг/м³; V_p – скорость продольной волны, м/с; A_p – колебательное ускорение, м/с²; τ_p – длительность колебаний продольных волн, с; T – период колебания, с.

Для горно-геологических условий шахты «Комсомольская», с учетом приведенных выше характеристик аппаратуры при $E_{\min} = 100$ Дж и $A_p = 0,00032$ м/с² из уравнения (2) было получено $R_s = 1818$ м, а при $E_{\min} = 10$ Дж $R_s = 872$ м.

Ниже описаны некоторые результаты мониторинга сейсмической активности в целом по шахте и ее отдельному участку (лаве).

В **табл. 1** приведены данные об изменении среднемесячной сейсмической активности, в **табл. 2** – об энергии событий по шахтному полю шахты «Комсомольская» в период 2014–2019 гг. В **табл. 3** дано сопоставление результатов наблюдений за 2017 и 2019 гг.

В 2019 г. в сравнении с 2018 г. снизилась доля слабых (до 500 Дж) событий с 78 до 62 %, но увеличился удельный вес средних по энергетике (500–2000 Дж) событий (с 16 до 28 %). При этом доля крупных событий с энергией 2000–4500 Дж возросла до 5 %, с энергией 4500–10000 Дж – до 3,3 %. В 2018 г. было зарегистрировано три мощных события с энергией свыше 10000 Дж, что составило 0,08 % общего числа событий.

На **рис. 2** показана диаграмма изменений суммарной энергии сейсмических событий E и относительно критерия B , который определяется по формуле

$$B = F/F_{\max}, \quad (3)$$

где F – среднее значение комплексного параметра, включающего безразмерную величину сейсмической деформации и сейсмическую активность; F_{\max} – максимальная зафиксированная величина параметра в расчетной ячейке.

Из диаграммы следует, что крупным сейсмическим событиям с высоким уровнем E в большей части случаев предшествует возрастание отношения B , которое свидетельствует о распространении сейсмоактивности по всему полю, и в дальнейшем наблюдается резкий спад отношения B , что соответствует концентрации событий в наиболее напряженной зоне. Данная закономерность может стать одним из признаков возможной подготовки крупного сейсмического события.

В июле 2019 г. выполнен монтаж датчиков системы сейсмического мониторинга в подготовительных выработках лавы 211-ю пласта Четвертый. После настройки параметров регистрации система сейсмического мониторинга GITS переведена в опытно-промышленную эксплуатацию. На **рис. 3** приведены результаты мониторинга за 2019 г. в форме карты гипоцентров сейсмических событий по лаве 211-ю пласта Четвертый. При отработке лавы с июля по ноябрь 2019 г. было зарегистрировано 5220 событий, в основном с энергией $E < 500$ Дж, также было зафиксировано 27 событий с энергией $E > 1000$ Дж (**табл. 4**). За рассматриваемый период подвигание забоя лавы 211-ю пласта Четвертый составило 340 м.

Таблица 1. Среднемесячная сейсмическая активность

Год	Сейсмическая активность (число событий в месяц)			Всего событий
	min	средняя	max	
2014	30	610,2	1376	7125
2015	13	429,1	918	4236
2016	3	237	536	2853
2017	59	290,2	810	3357
2018	54	415,5	891	4997
2019	71	314,3	801	3922

Таблица 2. Энергия событий по годам

Год	Показатель энергии событий, Дж		
	min	средний	max
2014	21	773,7	12861
2015	30	1103	24815
2016	51	1150	9308
2017	26	721,4	13369
2018	8	546	16652
2019	10	810	14639

Таблица 3. Статистические данные (сейсмические события с декабря 2016 г. по декабрь 2019 г.)

Диапазон энергий, Дж		Число событий			Процентное соотношение		
min	max	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
50	500	1650	3915	2450	49,15	78,35	62,47
500	2000	1543	831	1125	45,96	16,62	28,68
2000	4500	142	169	197	4,23	3,38	5,02
4500	10000	21	71	130	0,63	1,43	3,31
Больше 10 000		1	11	3	0,02	0,22	0,08
Всего		3357	4997	3922	100		

В плане гипоцентры событий распределены равномерно, что свидетельствует о непрерывности процессов релаксации напряжений в зоне опорного давления впереди очистного забоя.

На **рис. 4** представлен график изменения максимального значения энергии единичного события за сутки, совместно с моментами вторичной посадки кровли отработываемой лавы 211-ю пласта Четвертый, отмечена корреляция процесса посадки кровли с регистрацией относительно крупных сейсмических событий.

Выводы

1. Сейсмический региональный и локальный мониторинг обеспечивает решение широкого круга задач геотехнологии. При применении современных интенсивных технологий отработки угольных пластов (большая длина лавы, высокая скорость подвигания забоя) одной из приоритетных задач является прогноз опасных геодинамических явлений (горных и горно-тектонических ударов). При разработке автоматизированных систем сейсмического мониторинга целесообразно использовать пассивный метод измерений (регистрацию естественной сейсмической активности) с полустационарной установкой датчиков. Активные

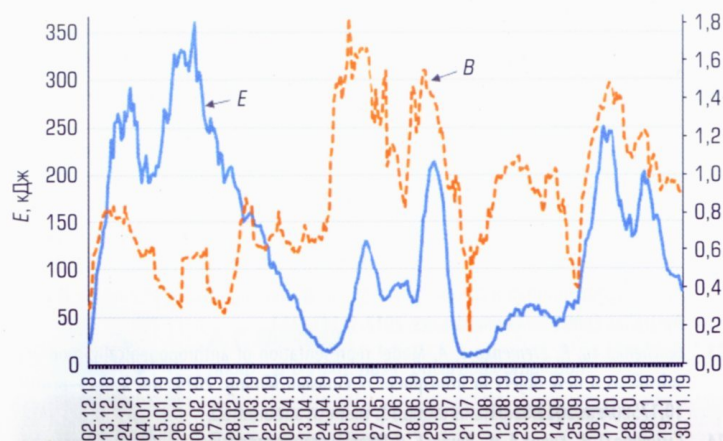


Рис. 2. Изменение суммарной энергии сейсмических событий E и относительного критерия B в течение года

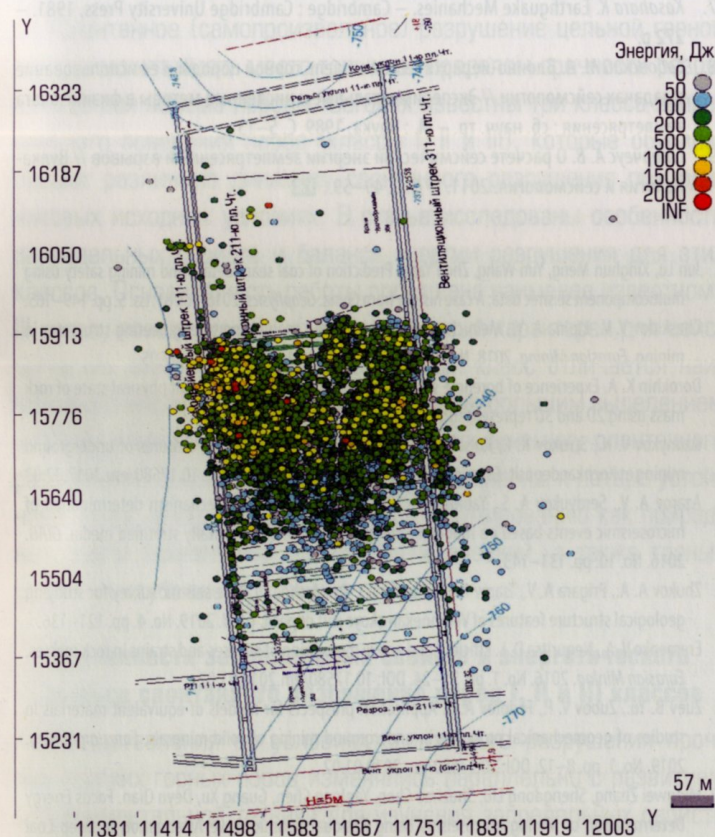


Рис. 3. Карта расположения гипоцентров сейсмических событий впереди лавы 211-ю пласта Четвертый

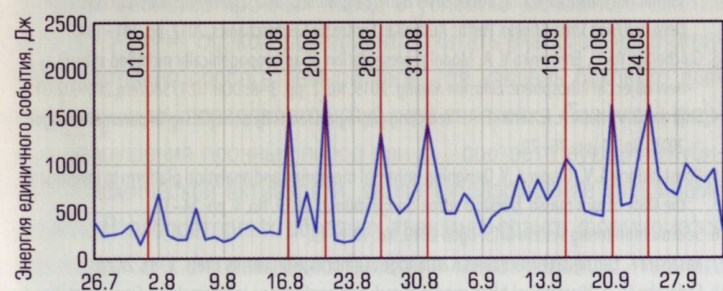


Рис. 4. График максимальной энергии единичного события за сутки (вертикальные линии — даты вторичной посадки кровли)

Таблица 4. Число событий с различной энергией на участке лавы 211-ю пласта Четвертый за 2019 г.

Диапазон энергии, Дж		Число событий	Процентное соотношение
min	max		
0	50	645	12,4
50	100	1670	32
100	200	1522	29,2
200	500	1140	21,8
500	1000	216	4,1
1000	2000	26	0,5
≥ 2000		1	0,02
Всего		5220	100

методы сейсмомониторинга (томография, межскважинное просвечивание, использование в качестве излучателя рабочего инструмента горного оборудования и др.) перспективны, но более сложны в технической реализации. При обработке и интерпретации баз данных сейсмомониторинга в перспективе целесообразно наряду с хорошо апробированными методами геолокации использовать нейросетевые технологии, регистрацию как продольных, так и поперечных волн, корректировку скоростей сейсмических волн, методы кластерного анализа и численного моделирования напряженно-деформированного состояния углеродного массива.

2. Разработанная во ВНИМИ система сейсмического мониторинга GITS обеспечивает региональный и локальный прогноз геодинамического состояния обрабатываемого угольного пласта. Выходная база данных системы включает координаты источников сейсмособытий и их энергию. В системе использовано от 6 до 12 трехкомпонентных датчиков пьезоэлектрического типа, устанавливаемых стационарно в скважинах или на постаментах и переустанавливаемых по мере развития горных работ или переходе на соседнюю лаву. Частотный диапазон сигнала — 150–1000 Гц, минимальный регистрируемый уровень сигнала 0,01 мВ.

3. В результате испытаний GITS в условиях шахты «Комсомольская» АО «Воркутауголь» в период 2014–2019 гг. установлены следующие закономерности:

- среднемесячная сейсмическая активность и средняя энергия событий относительно стабильны и находятся в диапазонах соответственно 2853–7125 и 546–1150 Дж, вместе с тем ежегодно происходит перераспределение долей событий с различной энергией;
- проявлению событий с максимальной суммарной энергией предшествует знакопеременное приращение относительного критерия, равного отношению комплексного сейсмического параметра к его максимальному значению в расчетной ячейке;
- равномерное расположение гипоцентров сейсмических событий при подвигании лавы на 340 м свидетельствует о стабильности процессов релаксации напряжений в зоне опорного давления, локальная их концентрация в массиве не происходит;
- локальные увеличения во времени средней энергии единичного события совпадают с моментами вторичной посадки кровли пласта.

Библиографический список

1. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity // *Geophysics*. 2019. Vol. 84. Iss. 1. P. 41–57.
2. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China // *Geophysics*. 2016. Vol. 81. Iss. 5. P. 149–165.
3. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining // *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
4. Дорохин К. А. Опыт применения скважинных сейсмоакустических исследований для оценки фактического состояния массива горных пород с использованием 2D- и 3D-построений // ГИАБ. 2019. № 5. С. 80–88.
5. Kalmykov V. N., Strukov K. I., Kulsaitov R. V., Esina E. N. Geomechanical features of underground mining at Kochkar deposit // *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. P. 12–15. DOI: 10.17580/em.2017.02.03
6. Азаров А. В., Сердюков А. С., Яблоков А. В. Методика определения механизмов очагов микросейсмических событий на основе моделирования полных волновых полей в горизонтально-слоистых средах // ГИАБ. 2016. № 10. С. 131–143.
7. Жуков А. А., Пригара А. М., Царев Р. И., Шусткина И. Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // ГИАБ. 2019. № 4. С. 121–136.
8. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses // *Eurasian Mining*. 2016. No. 1. P. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
9. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals // *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. P. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02

«GORNYI ZHURNAL», 2021, № 1, pp. 8–12
DOI: 10.17580/gzh.2021.01.02

Basic principles for building seismic monitoring systems in rockburst-hazardous coal seam mining

Information about authors

E. E. Razumov^{1,2}, Researcher, razumov@vniimi.ru

G. D. Rukavishnikov², Head of Center for Geodynamic Monitoring

S. N. Mulev², Director of Science

S. M. Prostov¹, Professor, Doctor of Engineering Sciences

¹Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

²VNIMI, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The main directions of development of seismic monitoring systems in underground mineral mining are analyzed. The expediency of passive registration of natural seismic activity is proved, which provides prediction of geodynamic phenomena by locating the centers of seismic events and determining their energy level. The methods of active seismic monitoring (seismic tomography, cross-borehole survey, recording of seismic signal from a rock-breaking tool) are technically more difficult to implement. The promising methods for processing seismic information are geolocation, neural network technology, cluster analysis, and integration with numerical stress–strain analysis of and changes in acoustic properties of rock mass.

The configuration of the platform developed at VNIMI and the GITS seismic monitoring system, which includes from 6 to 12 three-component seismic sensors installed permanently in wells or on pedestals, is described. The detailed layouts of seismic sensors at recording points and in gateways in extraction panels are presented. The main technical characteristics of GITS are given: the signal frequency range is 0.1–1000 Hz, the minimum recorded signal level is 0.01 mV.

The main test data of GITS in Komsomolskaya mine of Vorkutaulog are described: the average annual levels of seismic activity and energy of seismic events are found to be relatively stable; the relationship between seismic event with the maximum total energy and the alternating increment in the relative criterion is defined, and the local increase in the average energy of a single event in time from the moment the main roof caving is identified. Aimed to substantiate the regional and local prediction criteria of probability of geodynamic events caused by confining pressure, VNIMI implements integrated research in mines in different regions.

Keywords: underground mineral mining, geodynamic phenomena, confining pressure, events, local prediction, seismic monitoring.

References

1. Himanshu Barthwal, Mirko van der Baan. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*. 2019. Vol. 84, Iss. 1. pp. 41–57.

10. Mingwei Zhang, Shengdong Liu, Shuzhao Chen, Yanlong Chen, Guang Xu, Deyu Qian. Focus Energy Determination of Mining Microseisms Using Residual Seismic Wave Attenuation in Deep Coal Mining // *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018. ID 3854329. DOI: 10.1155/2018/3854329
11. Zhebel O., Eisner L. Simultaneous microseismic event localization and source mechanism determination // *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 2012. – Las Vegas : Society of Exploration Geophysicists, 2012. DOI: 10.1190/segam2012-1033.1
12. Chambers D. J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring a deep silver mine // *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. – Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. P. 141–154.
13. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere // *Eurasian Mining*. 2019. No. 2. P. 3–8. DOI: 10.17580/em.2019.02.01
14. Смирнов О. В., Кулик А. И., Ленин Е. А. Прогноз геологических нарушений по параметрам акустического сигнала // *Уголь*. 2015. № 11. С. 76–79.
15. Константинов А. В., Гладырь А. В. Проектирование универсальной измерительно-аналитической платформы для исследования состояния породного массива // *Известия вузов. Горный журнал*. 2019. № 4. С. 24–32.
16. Система сейсмического мониторинга GITS // *Уголь*. 2019. № 10. С. 15.
17. Kasahara K. *Earthquake Mechanics*. – Cambridge : Cambridge University Press, 1981. – 272 p.
18. Савоский М. А. Блочная-иерархическая модель горной породы и ее использование в задачах сейсмологии // *Экспериментальные и численные методы в физике очага землетрясения : сб. науч. тр. – М. : Наука, 1989. С. 5–13.*
19. Сторчевус А. В. О расчете сейсмической энергии землетрясений и взрывов // *Вулканология и сейсмология*. 2011. № 5. С. 49–59. **TX**

2. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang, Zhen Yang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China. *Geophysics*. 2016. Vol. 81, Iss. 5. pp. 149–165.
3. Cheskidov V. V., Lipina A. V., Melnichenko I. A. Integrated monitoring of engineering structures in mining. *Eurasian Mining*. 2018. No. 2. P. 18–21. DOI: 10.17580/em.2018.02.05
4. Dorokhin K. A. Experience of borehole seismic sounding for the assessment of physical state of rock mass using 2D and 3D representations. *GIAБ*. 2019. No. 5. pp. 80–88.
5. Kalmykov V. N., Strukov K. I., Kulsaitov R. V., Esina E. N. Geomechanical features of underground mining at Kochkar deposit. *Eurasian Mining*. 2017. No. 2. pp. 12–15. DOI: 10.17580/em.2017.02.03
6. Azarov A. V., Serdyukov A. S., Yablokov A. V. Methods of the focal mechanism determination of microseismic events based on modeling full wave fields in a horizontally stratified media. *GIAБ*. 2016. No. 10. pp. 131–143.
7. Zhukov A. A., Prigara A. V., Tsarev R. I., Shustkina I. Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *GIAБ*. 2019. No. 4. pp. 121–136.
8. Eremenko V. A., Neguritsa D. L. Efficient and active monitoring of stresses and strains in rock masses. *Eurasian Mining*. 2016. No. 1. pp. 21–24. DOI: 10.17580/em.2016.01.02
9. Zuev B. Yu., Zubov V. P., Fedorov A. S. Application prospects for models of equivalent materials in studies of geomechanical processes in underground mining of solid minerals. *Eurasian Mining*. 2019. No. 1. pp. 8–12. DOI: 10.17580/em.2019.01.02
10. Mingwei Zhang, Shengdong Liu, Shuzhao Chen, Yanlong Chen, Guang Xu, Deyu Qian. Focus Energy Determination of Mining Microseisms Using Residual Seismic Wave Attenuation in Deep Coal Mining. *Shock and Vibration*. 2018. Vol. 2018. ID 3854329. DOI: 10.1155/2018/3854329
11. Zhebel O., Eisner L. Simultaneous microseismic event localization and source mechanism determination. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* 2012. Las Vegas : Society of Exploration Geophysicists, 2012. DOI: 10.1190/segam2012-1033.1
12. Chambers D. J. A., Boltz M. S., Richardson J. R., Finley S. A. Application of subspace detection on a surface seismic network monitoring a deep silver mine. *Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Perth : Australian Centre for Geomechanics, 2017. pp. 141–154.
13. Galchenko Yu. P., Eremenko V. A. Model representation of anthropogenically modified subsoil as a new object in lithosphere. *Eurasian Mining*. 2019. No. 2. pp. 3–8. DOI: 10.17580/em.2019.02.01
14. Smirnov O. V., Kulik A. I., Lenin E. A. Predicting geological faults by acoustic signal parameters. *Ugol*. 2015. No. 11. pp. 76–79.
15. Konstantinov A. V., Gladys A. V. Designing universal measuring and analytical platform to investigate the state of rock massif. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2019. No. 4. pp. 24–32.
16. Seismic monitoring system GITS. *Ugol*. 2019. No. 10. p. 15.
17. Kasahara K. *Earthquake Mechanics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1981. 272 p.
18. Sadovsky M. A. Hierarchical block model of rock and applications in seismology. *Experimental and Numerical Methods in Physics of Earthquake Focus : Collection of Scientific Papers*. Moscow : Nauka, 1989. pp. 5–13.
19. Storchev A. V. Calculating the seismic energy of earthquakes and explosions. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011. Vol. 5, No. 5. pp. 341–350.