

И.Ю. Рассказов, А.В. Гладырь, Е.А. Кателла, В.И. Мирошников
РАЗРАБОТКА МНОГОУРОВНЕВОЙ СИСТЕМЫ
КОМПЛЕКСНОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА УДАРООПАСНОГО МАССИВА
ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрены конструктивные особенности и основные технические характеристики разработанной автоматизированной системы комплексного мониторинга, включающей в себя микросейсмическую, геоакустическую и деформационную измерительные подсистемы. Применение разработанного программно-аппаратного комплекса в качестве основного измерительно-аналитического средства при создании геодинамического полигона на рудниках ОАО «ППГХО», позволяет осуществлять регистрацию, обработку и всесторонний анализ сейсмодеоформационных сигналов в широком частотном и динамическом диапазонах.

Ключевые слова: горное давление, динамические проявления, геодинамический мониторинг, акустическая эмиссия, микросейсмика, деформации, база данных, интеграция данных.

ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ОАО «ППГХО») отрабатывает подземным способом ряд месторождений, характеризующихся сложными геомеханическими и удароопасными условиями. К настоящему времени на рудниках объединения (преимущественно на месторождении Антей) зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до сильных и разрушительных горных ударов, и с понижением горных работ и вовлечением в эксплуатацию рудников № 1 и № 2, прогнозируется рост количества и интенсивности этих опасных явлений.

Проявления горного давления на глубоких горизонтах месторождений протекают на фоне высокой геотектонической активности региона. Она обусловлена узлом пересечения глубинных трансблоковых меридиональных, широтных и северо-восточных разломов, где концентрировались тектономагматические события и динамические явления (в том числе

сейсмогенные), начиная с позднепротерозойского вплоть до новейшего времени. Тектонически-активный регион Юго-Восточного Забайкалья является слабоизученным, где до настоящего времени постоянные наблюдения за протеканием сейсмических процессов не проводились.

В последние годы на месторождениях ОАО «ППГХО» наблюдается усложнение геомеханической обстановки, что связано с ростом глубины разработки, увеличением выработанных пространств (в настоящее время суммарный объем выработанных пространств достиг 1,85 млн м³) и высокой концентрацией горных работ на Антее и соседних с ним месторождениях. Интенсивное техногенное воздействие на геосреду привело к активизации геодинамических процессов в районе месторождений, на что указывают наблюдающиеся подвижки по швам тектонических нарушений, толчкообразное деформирование массива и проявления техногенной сейсмичности.

В сложившихся условиях необходимы более углубленные комплексные геодинамические исследования, включающие изучение закономерностей геодинамических полей и процессов в области техногенного влияния горных работ с использованием сейсмических, сейсмоакустических, геодезических, сейсмодеформационных и иных методов с целью получения принципиально новой информации о напряженно-деформированном состоянии геологической среды.

Выполнение подобных исследований возможно лишь при условии создания на месторождениях ОАО «ППГХО» многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга (геодинамического полигона), которая бы объединяла целый ряд методов (сейсмический, деформационный, геоакустический, геодезический, тектонофизический и другие) и измерительных комплексов в единую интегрированную наблюдательную сеть. Создание такой системы и организация наблюдений позволит выделять региональные и локальные предвестники динамических явлений разного энергетического уровня в горных массивах и обосновать комплекс мер по эффективному освоению месторождений полезных ископаемых с учетом геодинамических и техногенных процессов в горных массивах.

Для надежной прогнозной оценки состояния массива и объективной интерпретации результатов наблюдений, полученных инструментальными методами, важную роль играет их сопоставление с модельными представлениями о напряженно-деформированном состоянии массива горных пород. Эти данные могут быть получены численными методами, а их объективность зависит от полноты учета горногеологических и горнотехнических особенностей разрабатываемых месторождений. Решение этой задачи

обеспечивается в том числе с применением программного комплекса MINEFRAME, дающего возможность создать объемную горногеологическую модель исследуемого участка рудничного поля [6]. В эту модель необходимо импортировать данные геомеханического мониторинга, которые могут быть представлены в различных обеспечивающий детальный анализ формах. В связи с этим, важное значение имеет не только обустройство геодинамического полигона, но и создание автоматизированной системы сбора, обработки и представления результатов наблюдений.

В настоящее время в районе Стрельцовского рудного поля, расположенного в Восточном Забайкалье России (ОАО «ППГХО»), ведется создание многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга, объединяющей ряд методов и измерительных комплексов в единую интегрированную наблюдательную сеть [5–9]. В состав системы входят следующие измерительные комплексы:

1. Автоматизированная геоакустическая система контроля горного давления «Prognoz ADS», которая позволяет регистрировать и определять параметры событий акустической эмиссии в частотном диапазоне 0,5–12 кГц.

2. Система микросейсмического мониторинга «Prognoz S», позволяющая регистрировать сейсмоакустические события в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц.

3. Длиннобазовый лазерный деформометр, предназначенный для измерения характеристик деформационного поля в зоне ведения горных работ в частотном диапазоне от 0 до 100 Гц.

4. Многоканальная система деформационных наблюдений и некоторые другие технические средства.

На стадии опытно-промышленной эксплуатации находится прибор опе-

ративного локального контроля угрозы опасности «Prognoz L», который обеспечивает регистрацию акустической эмиссии (АЭ) в диапазоне от 5 до 30 кГц, излучаемых в процессе необратимого деформирования горных пород.

Функциональная схема микросейсмического измерительного комплекса «Prognoz S» приведена на рис. 1. В качестве первичных преобразователей применяются трехкомпонентные сейсмоприемники электродинамического типа GMT-12,5, чувствительность которых составляет 30 В/м·с⁻¹, полоса рабочих частот – от 10 до 1000 Гц. В системе применяется аналого-цифровой преобразователь ZET230 и предварительный усили-

тель собственной разработки. В состав электронно-вычислительного блока, осуществляющего сбор данных с аналого-цифрового преобразователя осуществляется с использованием одноплатного миниатюрного компьютера марки D945GSEJT производства компании Intel США.

Блоки первичной регистрации и обработки сейсмосигналов (модули сбора данных) размещены в оборудованных в подземных горных выработках сейсморазведочных, где расположены скважины (2 вертикальные и 1 горизонтальная) диаметром 105 мм и глубиной 2 м, в которых установлены сейсмоприемники и шкаф с электронным и коммутационным оборудованием (рис. 2).

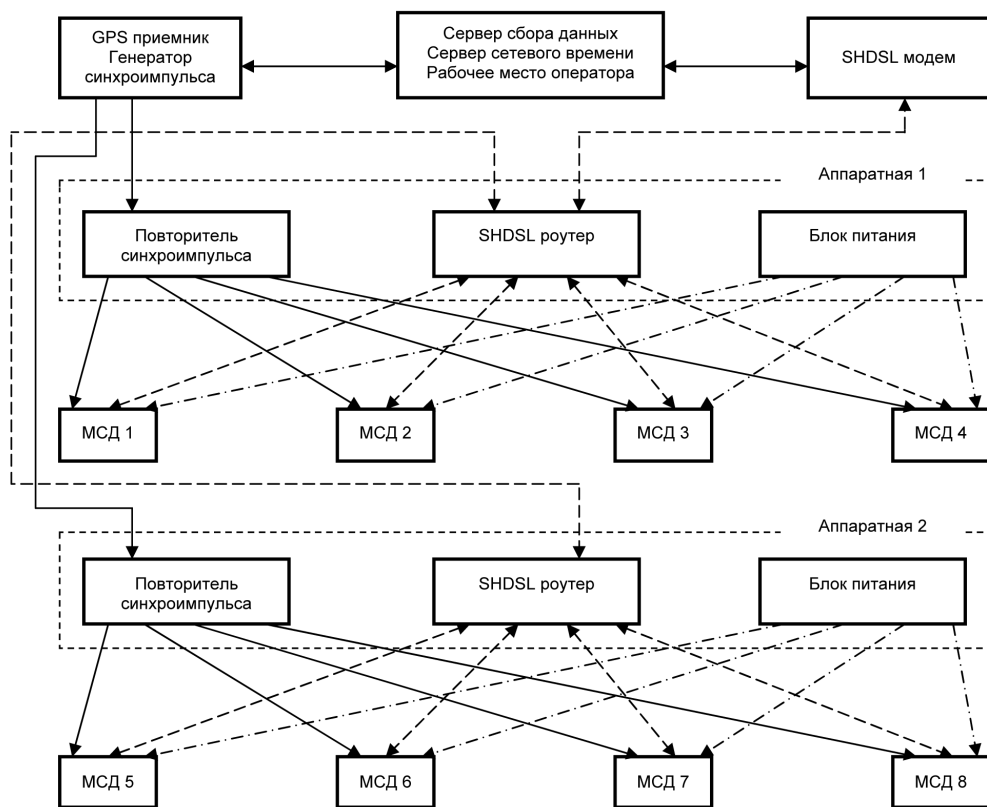


Рис. 1. Структурная схема системы микросейсмического мониторинга,
МСД – Модуль сбора данных



Рис. 2. Подземные модули микросейсмический измерительный комплекс «Prognoz S»

Сейсмопавильоны кабельными линиями связаны по схеме «звезда» с подземной аппаратной, в которой размещаются коммутационный шкаф, оснащенный промежуточным сервером, маршрутизатором, высокоскоростным модемом, аналого-цифровым преобразователем, источниками питания павильонов 48 В и источником автономного бесперебойного питания. Соединение подземной аппаратной с распределенной сетью модулей сбора данных (сейсмопавильонов) осуществляется по технологии SHDSL. Со стороны модуля сбора данных используется SHDSL модем SG-17B-12-M, а со стороны аппаратной SHDSL маршрутизатор SG-17S-1RU-CP1-2ETH/DC с установленными модулями MS-17H4 в количестве 2 шт. От подземной аппаратной информация по магистральному кабелю передается в центр обработки в поверхностном комплексе рудника.

В системе микросейсмического мониторинга «Prognoz S» организован сервер точного времени, получающий первичную информацию со спутников системы GPS. Дальнейшая синхронизация времени в сети модулей сбора данных осуществляется по протоколу Network Time Protocol (NTP), представляющему собой сетевой протокол для синхронизации внутренних часов компьютера с использованием сетей с переменной латентностью.

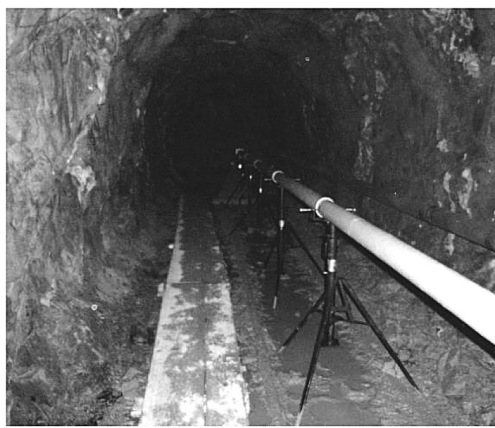
Дополнительная синхронизация времени осуществляется путем формирования дополнительного синхроимпульса на основе сигнала PPS, получаемого с GPS приемника.

Для обеспечения электрозащиты элементов системы мониторинга были разработаны и изготовлены электронные устройства защиты линий, обеспечивающие трехуровневую защиту, основанную на совместном применении: газоразрядных ламп, быстродействующих TVS диодов и самовосстанавливающихся предохранителей.

В результате эксплуатации измерительного комплекса установлено, что скорость передачи данных между подземной аппаратной и установленными в массиве горных пород модулями сбора данных составляют не менее 7168 Кбит/с, а среднее расхождение времени при использовании протокола NTP на дистанциях 500 м и более в течение суток не превышает 13 мс. Среднее расхождение времени внутри секунды менее одного такта АЦП. Применение разработанного на основе алгоритма STA/LTA программного обеспечения для автоматического детектирования сейсмического импульса совместно с полосовыми цифровыми фильтрами обеспечивают эффективное выделение полезных сигналов в сложной помеховой обстановке действующего горнодобывающего предприятия.



а



б

Рис. 3. Основные блоки лазерного деформометра, установленного в горных выработках уранового рудника (г. Краснокаменск): а – оптико-электронная часть; б – оптический лучевод

Для измерения характеристик деформационного поля в зоне ведения горных работ в многоуровневую систему мониторинга включен длинноточный лазерный деформометр, оптико-механическая часть лазерного которого собрана на основе модифицированного интерферометра Майкельсона неравноплечего типа с системой электронной регистрации изменения разности длин плеч интерферометра [9]. Оптико-механическая часть включает центральный интерференционный узел и уголкового отражателя, расположенные на бетонных блоках, отстоящих друг от друга на расстоянии 50 м. Оптическая связь между центральным интерференционным узлом и уголкового отражателем обеспечивается через воздушно-наполненный световод, внутри которого распространяется лазерный луч.

В состав центрального интерференционного узла входят: оптический стол; частотно-стабилизированный He+Ne – лазер фирмы Melles Griot типа 25-STP 912–230 Compact; оптический затвор; коллиматор фирмы Melles Griot типа 09 LBM 013; полупрозрачная плоскопараллельная

пластина ПИ-100; цифровая система экстремального регулирования; два плоскопараллельных юстировочных зеркала на пьезокерамике; фотоприемник ФД-24К; технологические и юстировочные стойки. Лазерный деформометр имеет следующие технические характеристики: точность измерения смещений массива горных пород составляет от 0,3 нм; предельный порог чувствительности – 10^{-10} ; полоса рабочих частот – от 0 до 100 Гц.

Результатом геодинамического мониторинга комплексом измерительных средств является создание единого банка данных о состоянии геосреды. Совместная интерпретация данных геоакустического, микросейсмического и деформационного мониторинга, соотнесенная с геологической и горнотехнической объемными моделями, обеспечивает высокую надежность прогнозных оценок.

В настоящее время в ОАО «ППГХО» в качестве основного инструмента применяется программный комплекс Mineframe, предназначенный для комплексного решения широкого круга геологических, маркшейдерских и технологических задач. Система со-

держит обширный набор инструментов, позволяющих работать с трехмерными моделями объектов горной технологии. Среди них геологические пробы, рудные тела и пласты, маркшейдерские точки, горные выработки, выемочные единицы, конструктивные элементы и узлы системы разработки, естественные и технологические поверхности (включая карьеры и отвалы), склады (штабели) и развалы горной массы.

Для хранения информации о результатах геомеханического мониторинга в системе Mineframe была организована дополнительная база данных с описаниями зарегистрированных микросейсмических и акустико-эмиссионных событий и таблицей для хранения отчетов по результатам деформационного мониторинга, а также разработано специальное программного обеспечения для информационного обмена между базой данных Mineframe и базами данных систем геомеханического мониторинга.

Функциональная схема взаимосвязей между базами данных используемых программных и программно-аппаратных комплексов приведена на рис. 4.

Для автоматической синхронизации данных микросейсмического и акустического мониторинга с базой данных Mineframe разработано специальное программное обеспечение «GeoAcousticsToFirebird».

Основная функциональность заключается в осуществлении с заданной периодичностью опросов существующих баз данных систем микросейсмического и акустического мониторинга, и при наличии новых с момента предыдущего опроса данных их передачу в базу данных системы Mineframe.

Для загрузки отчетов по работе деформографа (в формате .pdf) в базу данных Mineframe предназначена программа DeformReportApp. Программа DeformReportApp позволяет загружать отчеты в базу данных, просмотра списка хранящихся отчетов и удаления ненужных отчетов.

Специально разработанная библиотека igdprognoz.dll предназначена для совместной работы с программным комплексом Mineframe и представляет собой реализацию алгорит-



Рис. 4. Функциональная схема взаимосвязей между базами данных

мов по обработке данных акустического и сейсмического мониторинга.

Данный программный модуль позволяет рассчитывать:

- сводную информацию по зарегистрированным событиям;
- зависимость количества событий от даты мониторинга;
- зависимость суммарной энергии от даты мониторинга;
- пространственную карту зарегистрированных событий;
- карты плотности распределения событий для произвольных разрезов;
- карты распределения энергии для произвольных разрезов;
- карты распределения коэффициента удароопасности для разрезов параллельных координатным плоскостям системы координат (ХОУ, ХОZ, YOZ);
- изолинии уровня, которые можно накладывать на любую из перечисленных карт (кроме пространственной).

Исходные данные программный модуль получает из базы данных ком-

плекса Mineframe, в которую информация о событиях поступает в автоматическом режиме.

Разработка базы данных для хранения информации о результатах геомеханического мониторинга, а так же вышеперечисленных программных продуктов проводилась совместно с разработчиками системы Mineframe – специалистами Горного института КНЦ РАН [6].

Применение многоуровневой системы геодинамического мониторинга позволило увеличить количество и качество получаемой информации о состоянии горного массива, что дает возможность выделять региональные и локальные предвестники опасных динамических явлений и обосновывать комплекс эффективных мер по снижению уровня геодинамического риска при освоении месторождений полезных ископаемых в сложных горногеологических и удароопасных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ямшиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.

2. Вознесенский А.С. Системы контроля геомеханических процессов. – М.: Изд. МГТУ, 2002.

3. Mendecki A.J. Seismic monitoring in mine. London: Chapman and Hall, 1997.

4. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25–29.

5. Рассказов И.Ю., Калинов Г.А., Мирошников В.И., Мигунов Д.С., Искра А.Ю., Аникин П.А. Методы и средства контроля удароопасности при ведении подземных горных работ на рудниках Дальневосточного региона / Записки Горного института. Т. 188. Современные проблемы геодинамической безопасности при освоении месторождений полезных ископаемых. – СПб., 2010. – С. 18–22.

6. Лукичев С.В., Наговицын О.В. Компьютерная технология инженерного обес-

печения горных работ при освоении месторождений твердых полезных ископаемых // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 11–15.

7. Гладырь А.В., Мирошников В.И., Болотин Ю.И., Александров А.В., Аникин П.А., Рассказов М.И. Техническое оснащение системы микросейсмического мониторинга нового поколения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 5. – С. 174–180.

8. Rasskazov I.Yu., Lugovoy V.A., Kalinov G.A., Gladyr A.V., Anikin P.A., Rasskazov M.I., Tsoj D.I. Development of measuring complexes for the assessment and control of burst-hazard during mining // Proceedings of the 8-th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (Russia, Saint-Petersburg – Moscow. 1–7 September 2013). – Obninsk-Perm, 2013. – Pp. 121–124.

9. Долгих Г.И., Рассказов И.Ю., Луговой В.А., Аникин П.А., Цой Д.И., Яковенко С.В., Швеи В.А. Краснокаменский лазерный деформограф // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 5. – С. 138–139. **ГИАБ**

Рассказов Игорь Юрьевич – доктор технических наук, директор, e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
Гладырь А.В. – старший научный сотрудник, e-mail: rush3112@mail.ru,
Кателла Е.А. – старший инженер, e-mail: katellaevgenii@gmail.com,
Мирошников В. И. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
e-mail: mirosh@igd.khv.ru,
Институт горного дела ДВО РАН.

UDC 622.831.31

DEVELOPMENT OF THE COMPLEX GEODYNAMIC MULTILEVEL SYSTEM FOR BURST-HAZARD ROCK MASS MONITORING

Rasskazov I.Yu., Doctor of Technical Sciences, Director, e-mail: rasskazov@igd.khv.ru,
Gladyr A.V., Senior Researcher, e-mail: rush3112@mail.ru,
Katella E.A., Senior Engineer e-mail: katellaevgenii@gmail.com,
Miroshnikov V.I., Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: mirosh@igd.khv.ru,
Mining Institute of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

To prevent dangerous dynamic rock pressure during mining operations requires the use of complex techniques and equipment monitoring geomechanical rock massif.

The paper discusses the basic design features and specifications developed automated complex monitoring system includes microseismic, geoacoustic and deformation measurement subsystem.

Application of the developed hardware and software system as the primary means of measuring and analytical when creating geodynamic polygon in the mines of «PPGHO» allows recording, processing and comprehensive analysis seismic and deformation signals over a wide frequency and dynamic range.

Key words: rock pressure, dynamic events, geodynamic monitoring, acoustic emission, microseismic, deformation, database, data integration.

REFERENCES

1. Yamshchikov V.S. *Metody i sredstva issledovaniya i kontrolya gornykh porod i protsessov* (Methods and tools for research and control of rocks and processes), Moscow, Nedra, 1982.
2. Voznesenskii A.S. *Sistemy kontrolya geomekhanicheskikh protsessov* (Geomechanical processes Control systems), Moscow, Izd. MGGU, 2002.
3. Mendecki A.J. *Seismic monitoring in mine*. London: Chapman and Hall, 1997.
4. Malovichko A.A., Malovichko D.A., Dyagilev R.A. *Gornyi zhurnal*, 2008, no 10, pp. 25–29.
5. Rasskazov I.Yu., Kalinov G.A., Miroshnikov V.I., Migunov D.S., Iskra A.Yu., Anikin P.A. *Zapiski Gornogo instituta. T. 188. Sovremennye problemy geodinamicheskoi bezopasnosti pri osvoenii mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* (Mining Institute Notes. Vol. 188. Modern problems of geodynamic safety during the development of mineral deposits), Saint-Petersburg, 2010, pp. 18–22.
6. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V. *Gornyi zhurnal*. 2010, no 9, pp. 11–15.
7. Gladyr' A.V., Miroshnikov V.I., Bolotin Yu.I., Aleksandrov A.V., Anikin P.A., Rasskazov M.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, 2012, no 5, pp. 174–180.
8. Rasskazov I.Yu., Lugovoy V.A., Kalinov G.A., Gladyr A.V., Anikin P.A., Rasskazov M.I., Tsoi D.I. *Development of measuring complexes for the assessment and control of burst-hazard during mining. Proceedings of the 8-th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines* (Russia, Saint-Petersburg Moscow. 1–7 September 2013), Obninsk-Perm, 2013, pp. 121–124.
9. Dolgikh G.I., Rasskazov I.Yu., Lugovoi V.A., Anikin P.A., Tsoi D.I., Yakovenko S.V., Shvets V.A. *Pri-bory i tekhnika eksperimenta*, 2013, no 5, pp. 138–139.

