

**А. Е. Пушкарев<sup>1</sup>, Ф. В. Молев<sup>2</sup>, Н. Е. Манвелова<sup>2</sup>, А. Г. Сергушев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, Россия

## **ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*Сформулированы принципиальные вопросы, характеризующие особенности геомеханического мониторинга шахт и рудников. Представлены обоснованные подходы к выбору технических параметров и конструктивного исполнения измерительной аппаратуры для геомеханического мониторинга. Изложены примеры практической реализации сети геомеханического мониторинга, алгоритмы работы и пути дальнейшего развития.*

**Ключевые слова:** геомеханический мониторинг, шахта, рудник, тензометрический датчик, гибридная сеть, датчик деформации, координатор, ретранслятор, потенциометрический датчик.

Для цитирования: Подходы к построению сенсорных сетей для систем геомеханического мониторинга / А. Е. Пушкарев, Ф. В. Молев, Н. Е. Манвелова, А. Г. Сергушев // Радиопромышленность. – 2016. – № 4. – С. 6–13.

**A. E. Pushkarev<sup>1</sup>, F. V. Molev<sup>2</sup>, N. E. Manvelova<sup>2</sup>, A. G. Sergushev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Joint-stock company «Avangard», Saint-Petersburg, Russia

## **APPROACHES TO BUILDING OF SENSOR NETWORKS FOR GEOMECHANICAL MONITORING SYSTEMS**

*There have been formulated essential issues describing specifics of geomechanical monitoring of mines. Supported approaches to selection of technical parameters and design of instrumentation for geomechanical monitoring have been presented. Examples of actual implementation of geomechanical monitoring networks, operation algorithms and ways for further development have been described.*

**Keywords:** geomechanical monitoring, mine, strain gauge, hybrid network, strain gauge, coordinator, repeater, potentiometric sensor.

For citation: Pushkarev A. E., Molev F. V., Manvelova N. E., Sergushev A. G. Approaches to building of sensor networks for geomechanical monitoring systems. Radiopromyshlennost, 2016, no. 4, pp. 6–13. (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2016-4-6-13

С учетом особенностей горных выработок как объекта измерения деформаций задача формирования концепции организации мониторинга геомеханического состояния шахты не является простой [1–3]. Важное влияние на выбор средств измерения, точек замеров, способов сбора и передачи снимаемой информации оказывает значительная протяженность и конфигурация выработок, а также широкий диапазон изменения

регистрируемых параметров [4–6]. В этой связи при построении концепции следует решать ряд принципиальных вопросов.

1. Определение характеристик и конструктивного исполнения датчиков измерения деформации.
2. Обеспечение достаточной продолжительности времени автономной работы датчиков от комплекта аккумуляторных батарей.

3. Обеспечение достоверности получаемой информации.
4. Снижение вероятности потери информации.
5. Передача информации с датчиков в пункт сбора и отображения данных на автоматизированном рабочем месте (АРМ) оператора системы.
6. Организация работы измерительного комплекса и др.

Опыт применения датчиков производства ОАО «Авангард» в системах геомеханического и конструкционного мониторинга гипсового рудника ОАО «Кнауф Гипс Новомосковск», рудника «Глубокий» ОАО «ППГХО» (г. Краснокаменск), ангара для хранения калиевой соли в ОАО «Уралкалий» (г. Березники, Пермский край), развязки Алабяно-Балтийского туннеля позволил сформулировать ряд подходов к выбору технических параметров и конструктивного исполнения измерительной аппаратуры для геомеханического мониторинга.

1. Тензометрический способ измерения деформации, диапазон измерения и высокая чувствительность датчиков в условиях шахты могут оказаться несоответствующими поставленной задаче измерений. Этот способ демонстрирует высокую эффективность в системах конструкционного мониторинга шахты, где в качестве элементов креплений датчиков используются анкеры. После установки анкеры имеют достаточно большой ход, что может привести к выходу чувствительных элементов датчика из строя (обрыв тензорезисторов), поэтому их следует использовать в случае, когда датчик может быть размещен непосредственно на элементе конструкции.

2. В ряде случаев целесообразной является замена тензорезисторного чувствительного элемента датчика на датчик перемещения, который имеет достаточный диапазон измерения, высокую механическую прочность и стабильность параметров во времени. При этом следует использовать шарнирные переходы на датчике, которые обеспечат работоспособность конструкции при нарушении соосности направления вектора воздействия и рабочей оси датчика. Так, использование в качестве чувствительных элементов потенциометрических датчиков перемещения, наиболее удовлетворяющих требованиям как по диапазону и точности измеряемых величин, так и по механической прочности и устойчивости к внешним воздействиям, является подходящим решением.

3. Время автономной работы зависит от того, насколько своевременно происходит сбор информации с датчиков. При этом важно учитывать, что если не происходит связь датчиков с координатором в установленный момент времени, то датчики будут находиться в активном энергозатратном режиме

не менее 30 минут, что приведет к быстрому разряду аккумуляторов.

4. Достоверность получаемой информации определяется правильностью регулировки параметров самого датчика и точностью установки на объекте.

Изготовитель обладает аттестованным бюро метрологии, на стенде которого все датчики проходят калибровку. Как правило, на время поверки датчики снимаются. Чтобы снизить издержки по снятию и установке датчиков, рекомендуется иметь подменный фонд датчиков. Это небольшое количество датчиков, которые поверяются сразу же перед установкой. Они устанавливаются на место группы датчиков, снимаемых на поверку. Соответственно, после поверки снятые датчики ставятся на место следующей группы, и так пока все датчики не будут поверены.

5. Причиной потери информации является разряд аккумуляторов одного из элементов сети. В этой связи необходим периодический мониторинг напряжения аккумуляторов всех энергонезависимых элементов сети с целью их оперативной замены. Производить считывание напряжения аккумуляторов целесообразно одновременно со снятием показаний датчиков.

6. Сетевой способ организации комплекса и беспроводной способ передачи информации является наиболее оптимальным для удобства сбора данных, т.к. позволяет производить дистанционный съем информации с комплекса датчиков одним оператором из одной точки в течение очень короткого времени.

Решением этой задачи является построение разветвленной сети, связывающей различные точки контроля внутри шахты с ПЭВМ (ноутбука) оператора, расположенного в здании административно-бытового комплекса.

Пример архитектуры сети геомеханического мониторинга рудника, реализующей сформулированные принципы, приведена на рис. 1, а структура сети – на рис. 2.

В состав сети (рис. 2) входят следующие компоненты:

- автоматизированное рабочее место оператора, состоящее из ПЭВМ (ноутбука) с предустановленным программным обеспечением;
- координатор сети датчиков;
- ретрансляторы;
- датчики деформаций.

Все элементы (кроме координатора сети датчиков) рассчитаны на работу с автономным питанием от аккумулятора и имеют два режима работы: режим пониженного энергопотребления и активный режим. Активный режим соответствует моментам

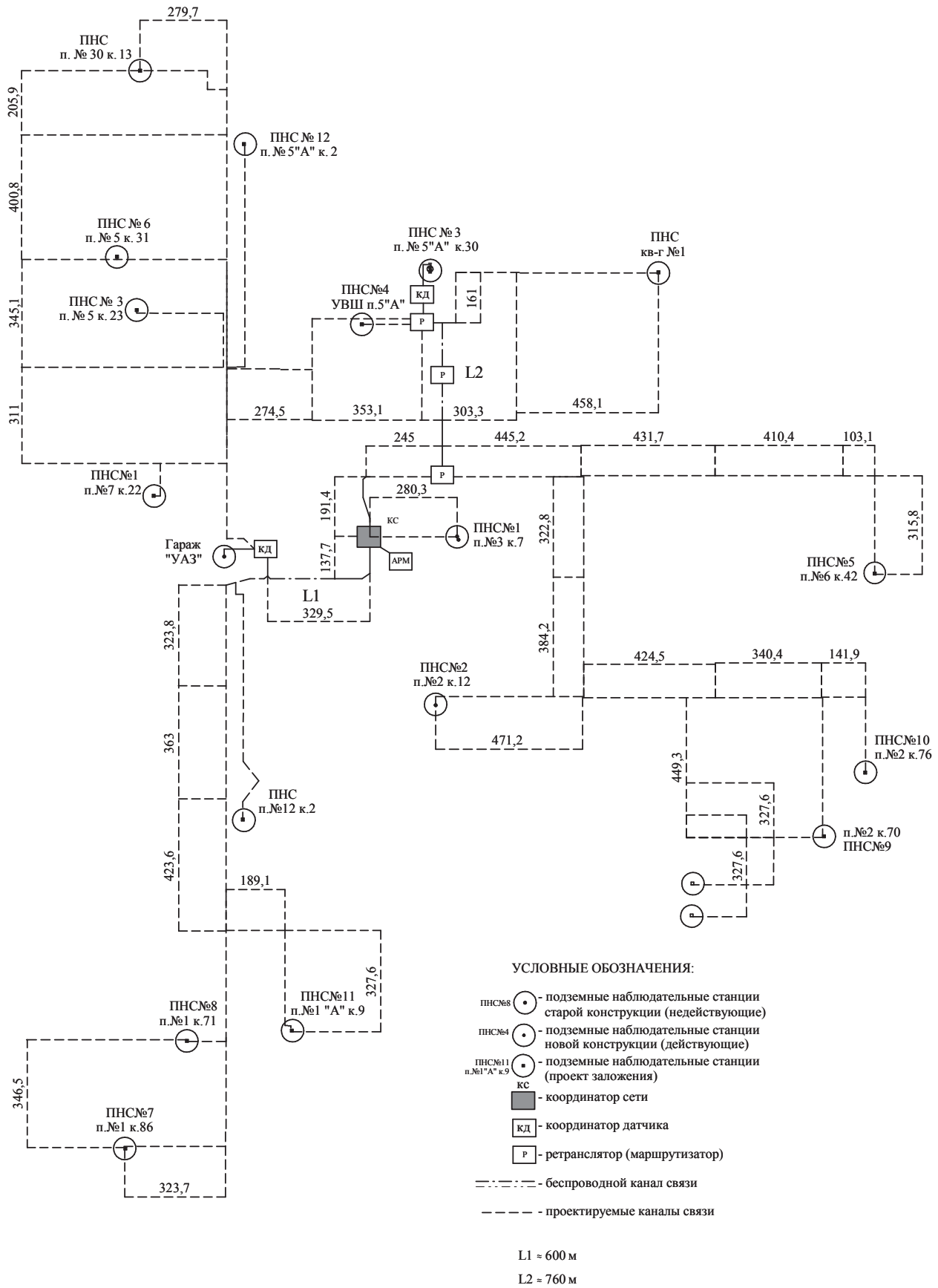


Рисунок 1. Архитектура сети беспроводной передачи информации от подземной наблюдательной станции на компьютер оператора

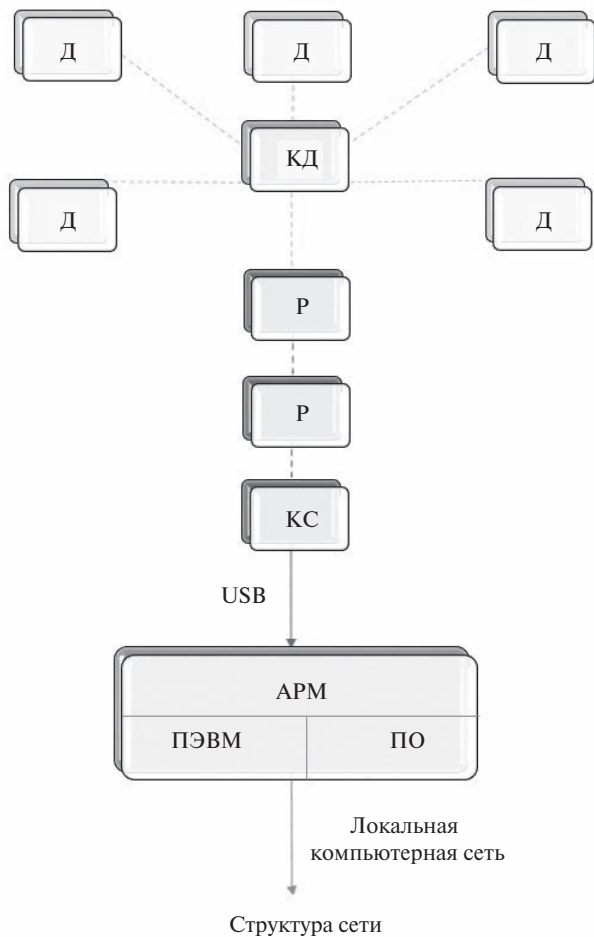


Рисунок 2. Структура сети беспроводной передачи информации от подземной наблюдательной станции на компьютер оператора

передачи данных по сети и наибольшему энергопотреблению. В остальные моменты времени устройства сети находятся в режиме пониженного энергопотребления.

Физическими протоколами, связывающими координатор сети датчиков с автоматизированными рабочими местами, является протокол USB-порта (при локальном соединении) или GSM(3G/GPRS)-соединение (при удаленном соединении).

В каждой подземной наблюдательной станции находятся координатор сети датчиков и набор датчиков (до 50 шт). Координатор датчиков снимает информацию с датчиков с заданным оператором интервалом (например, 7 дней), и в автоматическом режиме передает информацию на автоматизированное рабочее место или на центральный сервер системы через ретрансляторы и координатор сети. В случае обрыва связи (механическое повреждение элемента сети, пропадание сигнала GSM-сети или разряд аккумулятора одного из элементов сети) координатор датчиков сохраняет во встроенной флэш-памяти полученные данные

(до 100 измерений) и передает их на автоматизированное рабочее место или на центральный сервер системы после установления связи.

Технологической основой автоматизированной системы геомеханического и конструкционного мониторинга является гибридная сенсорная сеть датчиков деформаций. Гибридная сеть датчиков распределяется на отдельные подсети (сегменты), которые могут быть как беспроводными (или по стандарту ZigBee 2,4 ГГц, или по стандарту LoRaWAN868 МГц, в зависимости от конфигурации объекта), так и проводными по стандарту RS485 [7, 8]. Все датчики, включаемые в состав системы, предназначены для круглосуточной работы в автоматическом режиме.

Алгоритм функционирования системы:

1. Выход датчиков и координатора датчиков из режима пониженного энергопотребления.

Измерения осуществляются периодически с интервалом  $T$ , установленным оператором. Первоначально датчики и координатор датчиков находятся в режиме пониженного энергопотребления. По окончании установленного интервала  $T$ -координатор датчиков и его датчики одновременно переходят в активный режим. Одновременность обеспечивается точной настройкой часов реального времени (RTC), входящих в состав координаторов датчиков.

2. Измерения и передача результатов от датчиков координатору датчиков.

После п. 1 датчики производят измерения величин деформаций и напряжений аккумуляторов. Измеренные значения по беспроводной сети передаются координатору датчиков. Получив отклик от датчиков, через координатор датчиков добавляется информация о напряжении своего аккумулятора и записывается во внутреннюю память координатора. По запросу с АРМ формируется посылка и передается по сети через ретрансляторы к координатору сети.

3. Передача посылки по сети.

Передача посылки переводит в активный режим все ретрансляторы ветки сети, связывающие координатор датчиков и координатор сети. Каждое устройство добавляет к передаваемой посылке информацию о напряжении питания аккумулятора.

4. Прием посылки координатором сети и обмен данными с АРМ оператора.

Посылка данных, пришедшая по одной из веток в координатор сети, передается в АРМ оператора.

5. Передача данных с координатора сети на датчики.

Данные с АРМ оператора через координатор сети передаются по активной ветке, вызвавшей обмен данными, до координатора датчиков.

Координатор датчиков передает полученные данные датчикам, устанавливая в них новый режим

работы, если он был изменен, и переводит датчики в режим пониженного энергопотребления.

6. Переход в режим пониженного энергопотребления.

После п. 5 через координатора сети посылается в сеть команда «Sleep» и происходит переход в режим пониженного энергопотребления. Получившие данную команду по сети ретрансляторы последовательно переходят в режим пониженного энергопотребления, если в то же время другая ветка не является активной и если по всем активным каналам принята команда «Sleep».

7. Указанные в п. 1–6 действия периодически повторяются для датчиков всех подземных наблюдательных станций системы.

8. Обработка и представление данных оператору.

Принятые данные обрабатываются в АРМ оператора и отображаются в виде значений деформаций и значений напряжений аккумуляторов.

Разработанный алгоритм функционирования системы и отдельные его элементы были опробованы при реализации системы мониторинга геомеханического состояния шахты (или рудника) в трех проектах, реализованных ОАО «Авангард».

Первый из них – это система мониторинга состояния подземных выработок и контроля состояния кровли гипсового рудника ОАО «Кнауф Гипс Новомосковск» (рис. 3). Эта работа велась под

патронажем Тульской академии горных наук. Расположенные там наблюдательные станции были оборудованы струнными измерительными элементами. Периодически объезжая наблюдательные станции, обходчик фиксировал изменения положения струнного отвеса. Станции же, оборудованные датчиками производства ОАО «Авангард», при объединении их в единую сеть позволяли бы снимать измерения в динамике.

Вторым проектом были работы по оснащению рудника «Глубокий» ОАО «ППГХО» (г. Краснокамск) (рис. 4). В этом случае все павильоны, в которых контролировалось состояние выработок, были объединены в единую сеть и данные с них через координатор сети и блок передачи данных отправлялись в диспетчерский пункт, находящийся на поверхности земли. Соединение координатора с диспетчерским пунктом осуществлялось по кабелю RS-485, заложенному в скважину на поверхность.

Третьим успешно реализованным проектом была работа по оснащению ангара для хранения калиевой соли в ОАО «Уралкалий» г. Березники, Пермский край (рис. 5).

В двух первых проектах использовался очень трудоемкий и дорогостоящий процесс строительства и оборудования деформационных павильонов – это необходимость проходки ниш, бурения трех пар ортогональных скважин и установка глубинных реперов.

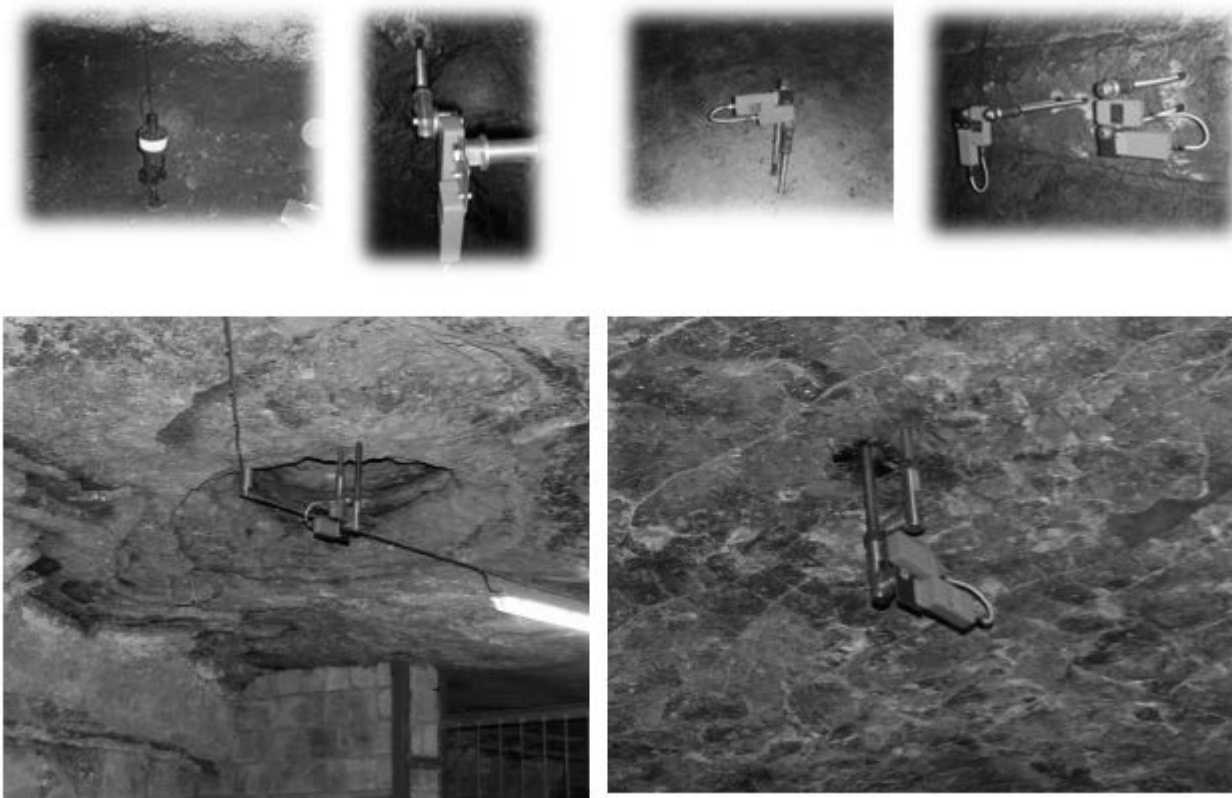


Рисунок 3. Мониторинг состояния подземных выработок и контроля состояния кровли рудника ОАО «Кнауф Гипс Новомосковск»



Рисунок 4. Система деформационного мониторинга на руднике «Глубокий» ОАО «ППГХО» (г. Краснокаменск)

Все это определило обязательную разработку новой конструкции датчика деформаций, позволяющего:

- отказаться от сооружения ниш;
- измерять три компоненты деформаций в одной точке (скважине) вместо бурения трех пар скважин;
- совместить репер и датчик, что дало возможность отказаться от установки длинных (15–20 м) реперов в каждой скважине;
- упростить установку большого количества точек измерения тензора деформаций в подземных выработках.

При этом создание системы мониторинга геомеханического состояния шахты (или рудника), принципы построения которой были изложены выше, возможно только на основе сенсорной сети датчиков деформаций.

Система мониторинга геомеханического состояния шахты предназначена для контроля текущего напряженно-деформированного состояния ее несущих конструкций и движения горных пластов в процессе выработки и обеспечивает:

- периодический контроль напряженно-деформированного состояния несущих конструкций

шахты и состояния пластов с выдачей информации о месте приближения измеренных значений к критическим значениям;

- гибкость конфигурации при установке датчиков и сенсорных узлов;
- при превышении измеренных значений критических напряжений и деформаций, формирование сигналов опасности, выдачу информации о месте превышения проектных значений прочности и деформации;
- автоматическую регистрацию событий в ПО АРМ, выдачу отчетов о событиях в соответствии с запросом оператора;
- возможность просмотра состояния объекта через web-браузер;
- автоматическое оповещение в виде sms-сообщений ответственным лицам при недопустимых значениях напряжений и деформаций в элементах конструкции шахты и критическом движении горных массивов.

Преимуществами подсистемы сбора данных являются:

- снижение трудозатрат на монтаж, пусконаладка и сопровождение;
- простота наращивания системы;

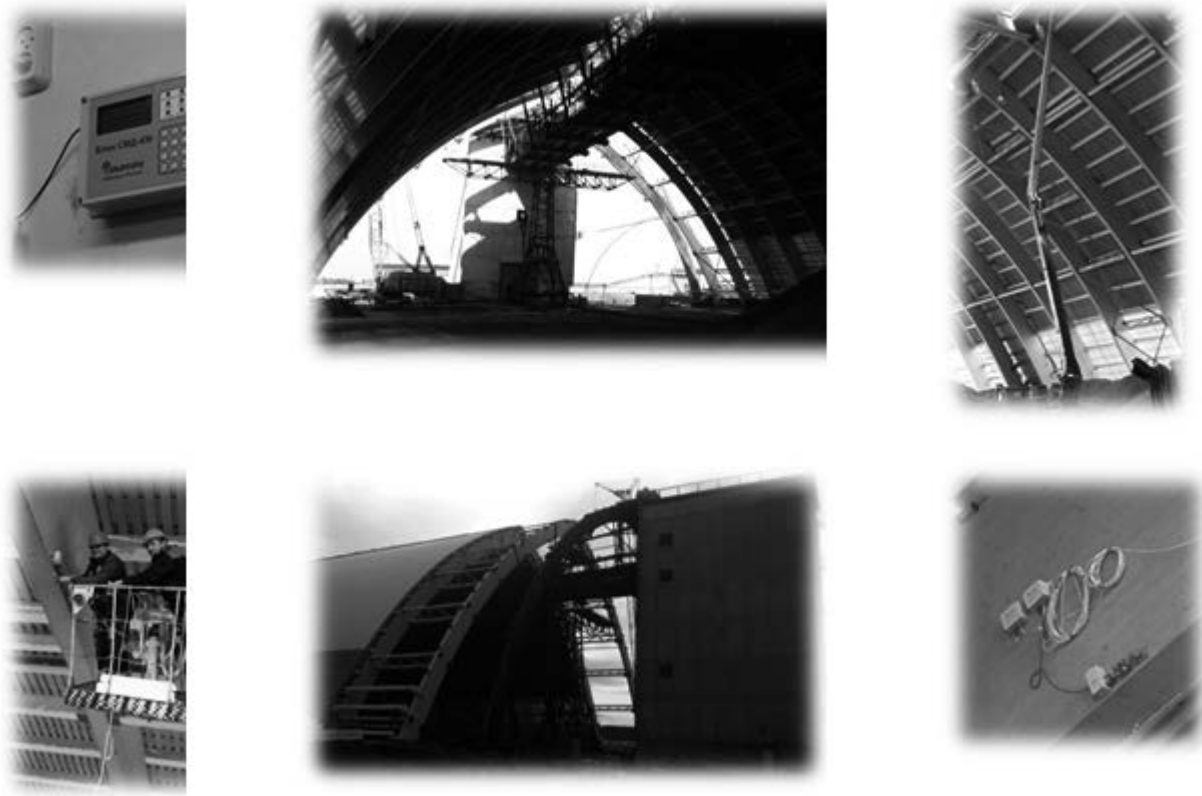


Рис. 5. Система мониторинга деформации кровли в ОАО «Уралкалий» (г. Березники, Пермский край)

- высокая отказоустойчивость в условиях возможного выхода из строя датчика.

Поскольку процесс деформации конструкции шахты и движения горных пород очень медленный и только в экстренных ситуациях требуется непрерывный поток информации, алгоритм работы системы позволяет задавать интервалы опроса датчиков от 5 секунд до 1 месяца. В большинстве случаев для мониторинга объекта достаточно 1–2 измерений в сутки. Такой интервал опроса системы (при использовании штатных блоков аккумуляторов) обеспечивает получение информации о состоянии объекта в течение одного года, а в случае непрерывного опроса датчиков – от 7 до 15 дней.

Опыт реализации предложенной концепции построения системы геомеханического мониторинга шахт и рудников на основе сенсорной сети проводных и беспроводных датчиков деформаций, полученный ОАО «Авангард» при реализации проектов систем геомеханического мониторинга гипсового рудника ООО «КНАУФ-ГИПС Новомосковск», рудника «Глубокий» ОАО «ППГХО» (г. Краснокаменск), ангара для хранения калиевой соли в ОАО «Уралкалий» (г. Березники, Пермский край), развязки Алабяно-Балтийского туннеля подтвердил перспективность практического применения предложенной концепции построения системы геомеханического мониторинга на основе сенсорной сети датчиков деформаций.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузичкин О.Р. Организация геодинамического контроля карста на основе геоэлектрических методов зондирования // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 106–112.
2. Кузичкин О.Р., Кулигин М.Н., Орехов А.А. Измерительный канал системы регистрации геомагнитных сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 122–128.
3. Кузичкин О.Р., Цаплев А.В. Алгоритмы параметрической температурной коррекции результатов геоэлектрического зондирования // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 128–134.
4. РД-07-113-96 Инструкция о порядке утверждения мер охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния горных разработок.
5. РД 07-408-01 Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр.
6. Методические указания по созданию систем контроля состояния горного массива и прогноза горных ударов как элементов многофункциональной системы безопасности угольных шахт. СПб.: ВНИМИ, 2012.

7. Шубарев В. А., Молев Ф. В., Сергушев А. Г., Шварцман А. И., Ширманов А. И. Система комплексной безопасности объектов энергетики, промышленности и транспорта на основе технологий сенсорных сетей // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 47–57.
8. Молев Ф. В., Сергушев А. Г., Ширманов А. И. Отказоустойчивая сенсорная сеть для системы мониторинга потенциально опасных промышленных объектов // Вопросы радиоэлектроники. 2015. № 1. С. 93–102.

## REFERENCES

1. Kuzichkin O. R. Organization of geodynamic control of karsts based on geoelectric sounding methods. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, no. 1, pp. 106–112. (In Russian).
2. Kuzichkin O. R., Kuligin M. N., Orekhov A. A. A measuring channel for geomagnetic signals recording system. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, no. 1, pp. 122–128. (In Russian).
3. Kuzichkin O. R., Tsaplev A. V. Algorithms of parametric temperature correction of geoelectric sounding results. *Voprosy radioelektroniki*, 2010, no. 1, pp. 128–134.
4. RD-07-113-96 Instruktsiya o poryadke utverzheniya mer okhrany zdaniy, sooruzheniy i prirodnykh obektov ot vrednogo vliyaniya gornyx razrabotok [RD-07-113-96 Guidelines on the procedure for approval of protection measures for buildings, structures and natural objects from harmful effects of mining].
5. RD07-408-01 Polozhenie o geologicheskom i marksheyderskom obespechenii promyshlennoy bezopasnosti i okhrany nedr [RD07-408-01 Regulations of geological survey and mine survey support for industrial safety and protection of mineral resources].
6. Metodicheskie ukazaniya po sozdaniyu sistem kontrolya sostoyaniya gornogo massiva i prognoza gornyx udarov kak elementov mnogofunktionalnoy sistemy bezopasnosti ugolnykh shakht [Guidelines for creation of systems for monitoring of rock mass condition and forecasting of rock burst shocks as elements of coal mines multi-functional safety system]. Saiyt-Petersburg, VNIMI Publ., 2012. (In Russian).
7. Shubarev V. A., Molev F. V., Sergushev A. G., Shvartsman A. I., Shirmanov A. I. Sensor network technology-based integrated security system for energy, industrial and transport facilities. *Voprosy radioelektroniki*, 2015, no. 1, pp. 47–57. (In Russian).
8. Molev F. V., Sergushev A. G., Shirmanov A. I. Failsafe sensor network for the system of monitoring of potentially hazardous industrial facilities. *Voprosy radioelektroniki*, 2015, no. 1, pp. 93–102. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пушкарев Александр Евгеньевич**, д.т.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, тел.: 8 (812) 575-05-34, e-mail: pushkarev-agn@mail.ru.

**Молев Федор Владимирович**, к.т.н., начальник отдела систем безопасности технических средств контроля и мониторинга, ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр-д, д.72, тел.: 8 (812) 740-08-11, доб. 84-71, e-mail: f.molev@gmail.com.

**Манвелова Наталья Евгеньевна**, к.т.н., доцент, главный специалист отдела планирования и организации НИОКР, ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр-д, д.72, тел.: 8 (812) 740-08-11, доб. 82-76, e-mail: manvelova@inbox.ru.

**Сергушев Алексей Геннадьевич**, к.т.н., начальник сектора отдела систем безопасности технических средств контроля и мониторинга, ОАО «Авангард», 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр-д, д.72, тел.: 8 (812) 740-08-11, доб. 81-28, e-mail: ags@pochta.ru.

## AUTHORS

**Pushkarev Aleksandr**, PhD, Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya st., Saint-Petersburg, 190005, tel.: +7 (812) 575-05-34, e-mail: pushkarev-agn@mail.ru.

**Molev Fedor**, PhD, head of the department safety systems technical means of verification and monitoring, Joint-stock company «Avangard», 72, Kondratievskiy pr., Saint-Petersburg, 195271, tel.: +7 (812) 540-15-50, ext. 84-71, e-mail: f.molev@gmail.com.

**Manvelova Natalia**, PhD, Assistant Professor, main specialist of the department of planning and organization of research and development, Joint-stock company «Avangard», 72, Kondratievskiy pr., Saint-Petersburg, 195271, tel.: +7 (812) 540-15-50, ext. 82-76, e-mail: manvelova@inbox.ru.

**Sergushev Alexey**, PhD, head of sector of the department safety systems technical means of verification and monitoring, Joint-stock company «Avangard», 72, Kondratievskiy pr., Saint-Petersburg, 195271, tel.: +7 (812) 540-15-50, ext. 81-28, e-mail: ags@pochta.ru.