

УДК 550.834

**АППАРАТНЫЕ РЕШЕНИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ
ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

С. В. Сердюков¹, А. В. Азаров¹, П. А. Дергач², А. А. Дучков²

¹*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ss3032yandex.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

²*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

Приведены аппаратные решения сбора микросейсмических данных, обеспечивающие повышение информативности микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых

Микросейсмический мониторинг геодинамических процессов, система сбора данных, массив горных пород, скважинный сейсмический прибор

Недостаток информации о состоянии массива горных пород и протекающих в нем процессах повышает риск катастрофических проявлений горного давления, гидро- и газодинамических явлений. Заблаговременное обнаружение проблемных участков увеличивает запас времени для анализа ситуации и выполнения мероприятий, направленных на повышение безопасности подземной разработки полезных ископаемых.

Эффективным методом дистанционного контроля геодинамических процессов является пассивный микросейсмический мониторинг (МСМ), состоящий из регистрации сейсмических сигналов и определения по ним гипоцентров, энергии и механизма наблюдаемых событий.

В горнодобывающей промышленности микросейсмический мониторинг проводят в основном с помощью малоканалльных подземных систем с линейными приемными антеннами и/или несколькими (одна-три) наземными сейсмологическими станциями. Известные аппаратно-программные решения имеют невысокое пространственное разрешение и чувствительность приема сейсмических сигналов, малый объем охвата породного массива наблюдениями слабых энергетических событий. В результате функции МСМ сводятся к определению параметров горных ударов, статистическим исследованиям сейсмичности с построением корреляционных зависимостей, имеющих низкие прогностические способности.

Для повышения информативности микросейсмического мониторинга в ИГД СО РАН совместно со специалистами ИНГГ СО РАН разработан комплекс аппаратно-программных средств АПК МСМ, адаптированный к приему и обработке слабых сейсмических событий при подзем-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект RFMEF160414X0047.

ной разработке твердых полезных ископаемых. Комплекс обеспечивает пространственную локацию и оценку геометрических параметров зон развития геодинамических процессов на основе быстрого решения прямых задач сейсмологии в анизотропных средах, оценку энергетических и кинематических параметров (смещение в пространстве с течением времени) геодинамических процессов, избирательное выявление микросейсмических событий, вызванных деформационными и фильтрационными процессами.

В настоящей статье рассмотрены аппаратные решения комплекса, разработанные на основе промышленных телеметрических сейсмических систем общего назначения.

Аппаратная часть АПК МСМ обеспечивает проведение микросейсмического мониторинга геодинамических процессов в массиве горных пород с использованием комбинированной системы наблюдения, состоящей из подземных (шахтных) и наземных приемных антенн, объединенных в единый комплекс, включающий:

- а) несколько подземных линейных приемных антенн в горных выработках из 6–12 пунктов трехкомпонентного приема в каждой с расстоянием между пунктами 10–50 м;
- б) наземную площадную приемную антенну из 48–1024 пунктов приема сейсмических сигналов, рассредоточенных по дневной поверхности с расстоянием между пунктами 30–50 м;
- в) систему сбора и обработки данных.

Комплекс АПК МСМ обеспечивает непрерывный сбор микросейсмических данных в форматах SEG-Y или SEG-D в частотном диапазоне 10–150 Гц с привязкой ко времени с точностью 1 мкс и системе наблюдений с точностью 1 см, а также чувствительность приема микросейсмических колебаний не хуже 85 В/м/с.

Общий вид аппаратных средств комплекса приведен на рис. 1, структурная схема — на рис. 2, функциональная схема — на рис. 3.

Особенностью разработанной архитектуры АПК МСМ является интеграция наземной и подземной приемных антенн в единый комплекс. Данные от подземных приемных антенн поступают в компьютер АРМ МСМ по кабелю через подземный маршрутизатор, магистральный кабель, блок барьеров подземной информационной сети шахты SBGPS (ООО НПФ “ГРАНЧ”, Новосибирск) [1] и далее через маршрутизатор и наземную корпоративную сеть Ethernet горнодобывающего предприятия (рис. 1, 2). Отметим, что система SBGPS в настоящее время внедрена на пяти шахтах СУЭК с перспективами оснащения ею всех угледобывающих шахт этой компании. Технические вопросы согласования АПК МСМ с SBGPS решены совместно с ООО НПФ “ГРАНЧ”.

Данные от наземной приемной антенны поступают в наземную станцию SCOUT (ОАО “СКБ СП”, Саратов) [2] и далее через беспроводную сеть Ethernet и клиентскую станцию в корпоративную сеть Ethernet горнодобывающего предприятия, а оттуда — в компьютер АРМ МСМ.

Применение однотипных полевых модулей обеспечивает единый формат записываемых данных (SEG-Y, SEG-D) и формирование в АРМ МСМ общего массива однородных данных для последующего редактирования и обработки.

Синхронизация по времени наземных полевых модулей осуществляется встроенными GPS приемниками. Синхронизация по времени подземных полевых модулей реализуется также по GPS сигналу, который передается от GPS приемника через корпоративную сеть Ethernet предприятия и подземную информационную сеть SBGPS по протоколу PTP (IEEE 1588) с помощью модулей синхронизации IEEE 1588 (рис. 2).

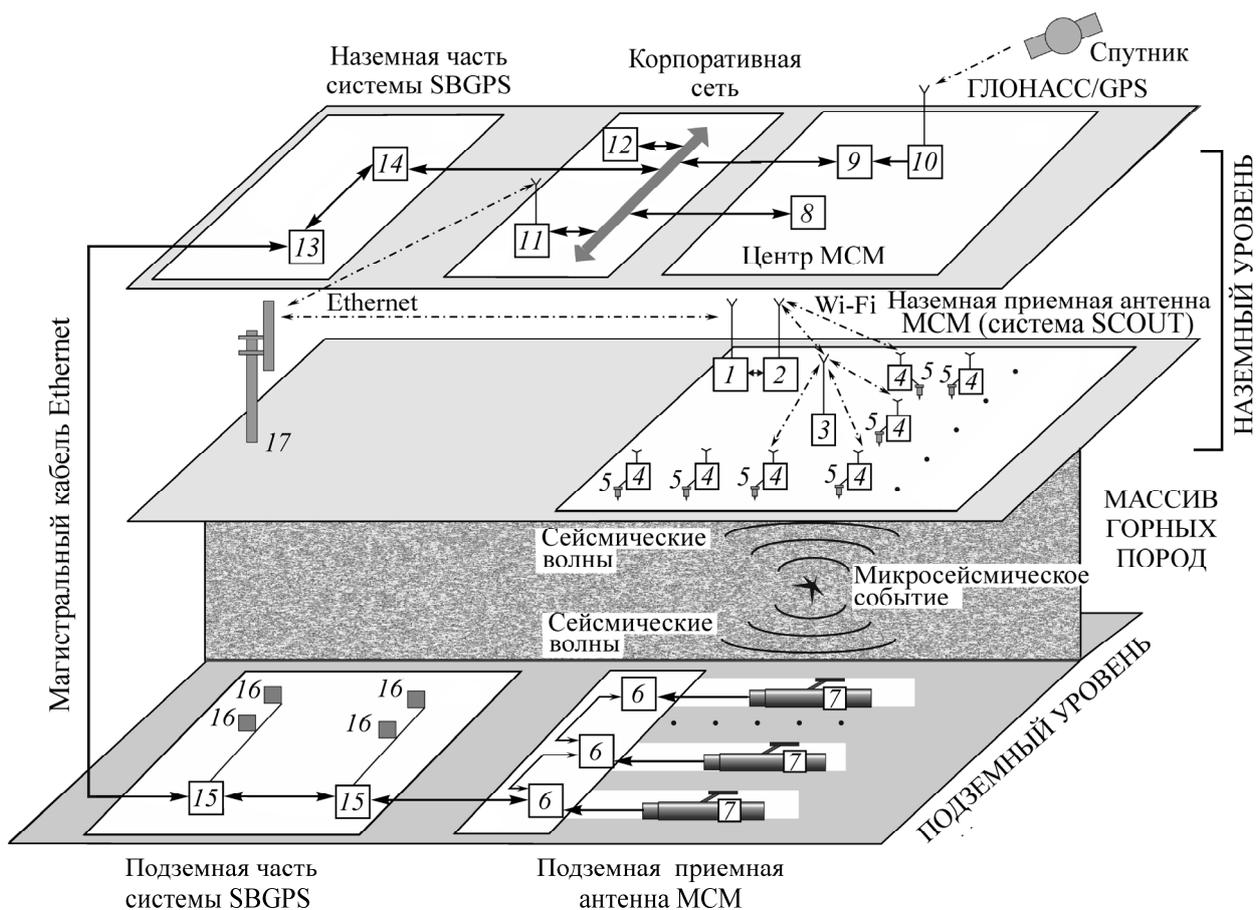


Рис. 1. Общий вид аппаратных средств аппаратно-программного комплекса МСМ геодинамических процессов в массиве горных пород: 1, 11 — клиентская станция беспроводной сети Ethernet; 2 — станция СУД SCOUT; 3 — точка доступа Wi-Fi; 4 — наземный пункт приема (ППН) — полевой модуль SCOUT; 5 — сейсмические приемники GS-One; 6 — подземный пункт приема (ППП) — модернизированный полевой модуль SCOUT шахтного исполнения; 7 — скважинный сейсмический датчик; 8 — компьютер центра сбора и обработки данных АРМ МСМ; 9 — модуль синхронизации протокола IEEE 1588; 10 — приемник ГЛОНАСС/GPS; 12 — сервер корпоративной сети Ethernet горнодобывающего предприятия; 13 — блок барьеров наземной части информационной шахтной системы SBGPS; 14 — маршрутизатор корпоративной сети Ethernet горнодобывающего предприятия; 15 — подземный маршрутизатор информационной шахтной системы SBGPS; 16 — базовая станция (БС) информационной шахтной системы SBGPS; 17 — точка доступа беспроводной сети Ethernet

В полевом модуле SCOUT использован цифровой сигнальный процессор ADSP BF 518 компании Analog Devices [3], который имеет встроенный контроллер доступа EMAC (ethernet media access controller) к среде Ethernet (рис. 3). Функциональные возможности контроллера EMAC в этом процессоре расширены для поддержки стандарта IEEE 1588 за счет добавления модуля TSYNC, а также ряда других функций, обеспечивающих работу по стандарту IEEE 1588 в сети Ethernet [3].

Выходной сигнал временной синхронизации PPS в процессоре ADSP BF518 обеспечивает гибкие возможности. Для его формирования используются программируемые значения времени запуска (PPS_ST) и периода (PPS_P). В результате выходной сигнал имеет вид импульсов в мо-

менты времени ($PPS_ST + n * PPS_P$), где $n = 1, 2, 3 \dots N$. В базовом варианте применения сигнала PPS величина PPS_P задается равной 1 с, а PPS_ST — любому еще не наступившему моменту времени, кратному секунде. Выходной сигнал PPS использован в качестве опорного для формирования периодического сигнала с полностью программируемыми частотой и временем запуска.

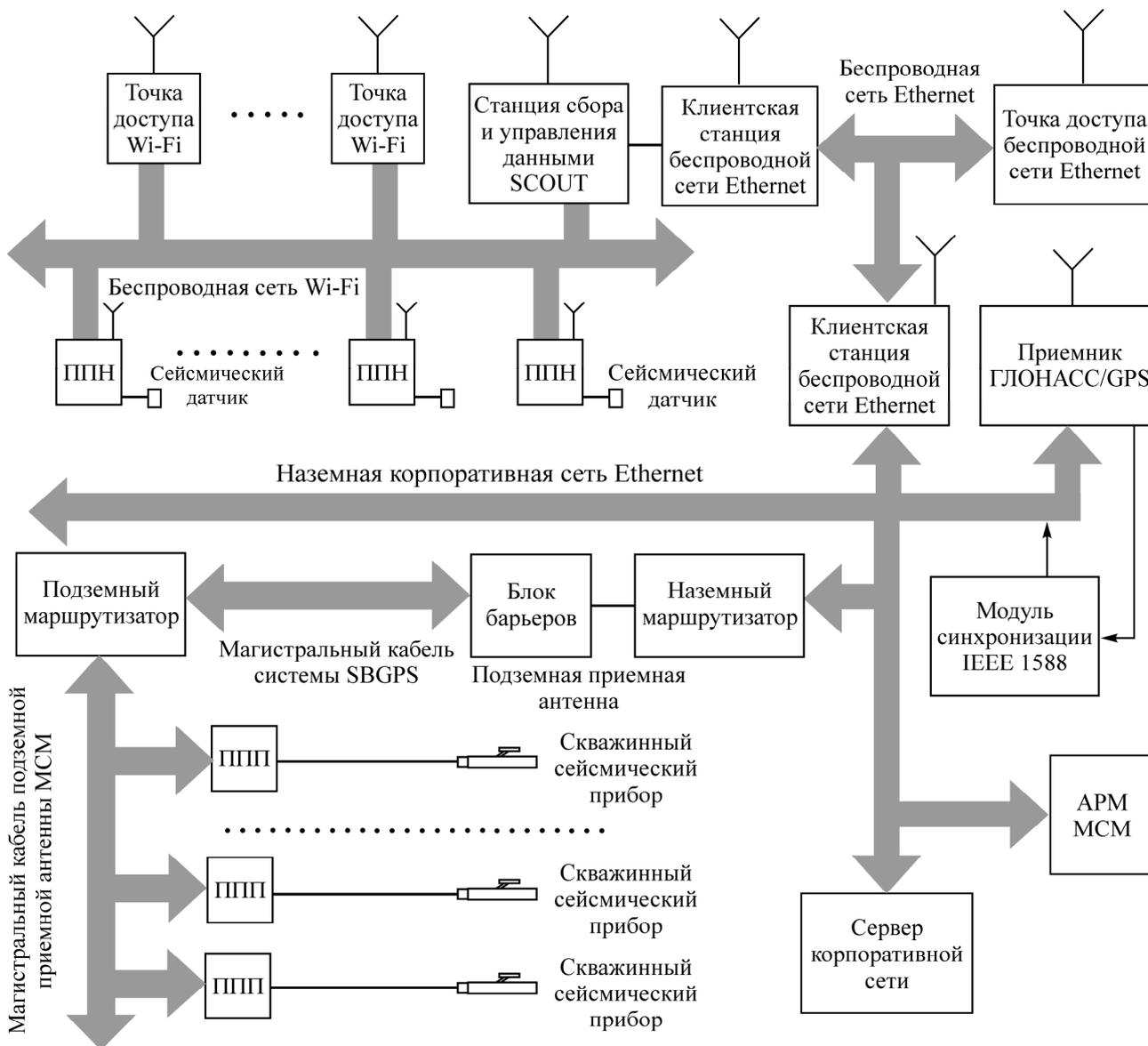


Рис. 2. Структурная схема аппаратных средств аппаратно-программного комплекса МСМ геодинамических процессов в массиве горных пород (АРМ — автоматизированное рабочее место (компьютер))

Указанные возможности процессора ADSP BF 518 обеспечивают простую адаптацию полевого модуля SCOUT к работе в составе подземных приемных антенн. Отличия модернизированного модуля от серийного сводятся к искровзрывобезопасному корпусу, а также к исключению из его конструкции GPS приемника, к минимизации объемов встроенной флэш-памяти и емкости внутреннего аккумулятора. Технические вопросы адаптации полевого модуля SCOUT к применению в подземных приемных антеннах АПК МСМ решены с производителем этого оборудования.

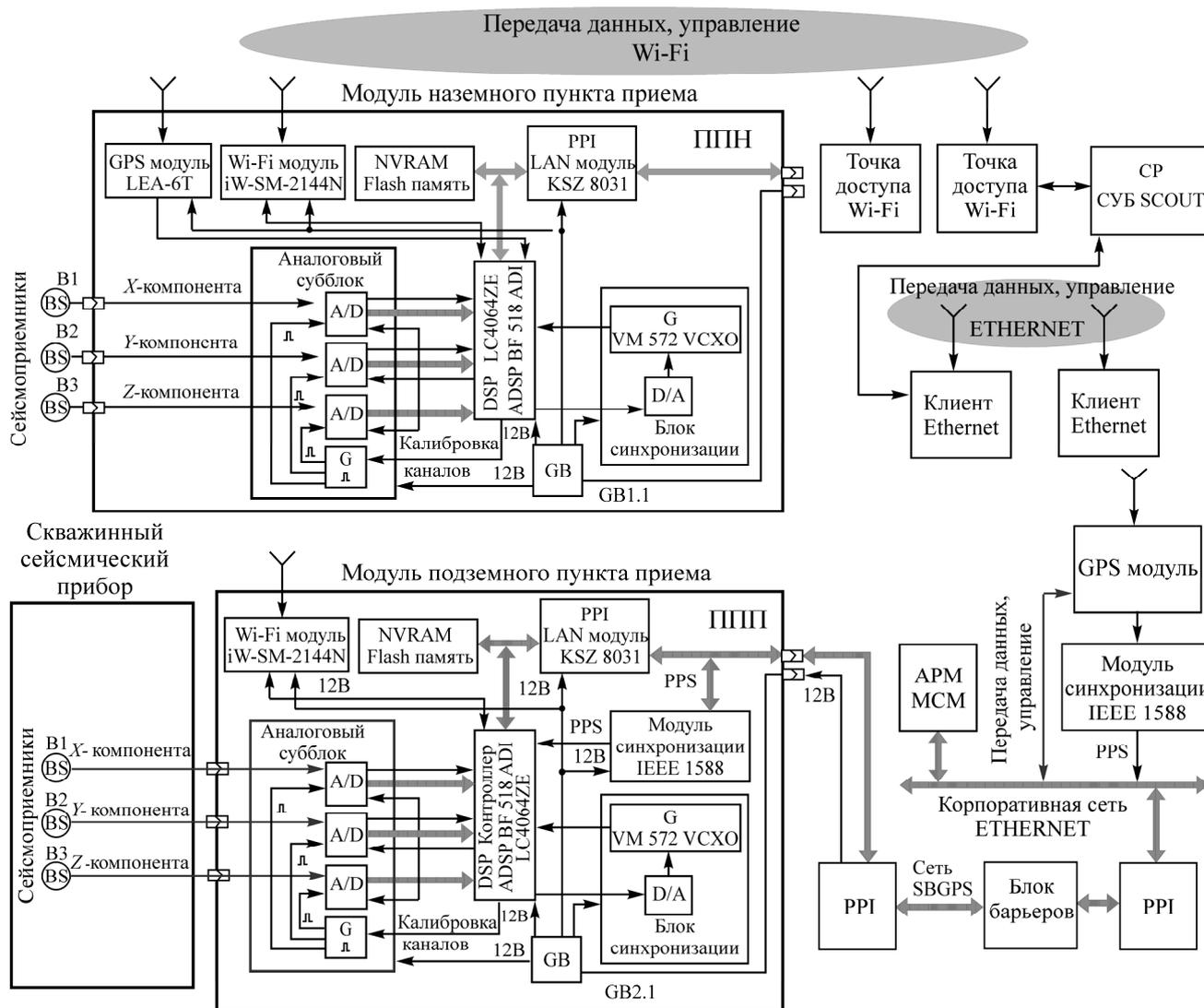


Рис. 3. Функциональная схема аппаратных средств аппаратно-программного комплекса МСМ геодинамических процессов в массиве горных пород (ППИ — преобразователь интерфейсов (маршрутизатор); СУБ SCOUT — компьютер сбора и управления данными наземной приемной антенны)

В отличие от наземного стандартного полевого модуля ППН, использующего беспроводную Wi-Fi передачу данных в станцию управления данными (СУД) SCOUT [2], для передачи сигналов от подземного полевого модуля ППП в качестве основного варианта использован кабельный интерфейс Ethernet (рис. 3). Выбор этого решения обусловлен следующими причинами:

а) проводная организация передачи данных обеспечивает высокую точность временной привязки регистрируемых данных МСМ;

б) кабельная связь подземного полевого сейсмического модуля с подземным маршрутизатором (или базовой станцией) информационной шахтной системы SBGPS обеспечивает простую организацию электрического питания от внешней искровзрывобезопасной батареи (источника питания) из состава подземного маршрутизатора или базовой станции аппаратуры SBGPS.

При таком техническом решении подземной приемной антенны нет необходимости в периодической замене гальванических батарей полевых сейсмических модулей ППП в шахтных условиях, что устраняет необходимость спуска обслуживающего персонала в шахту и существенно снижает стоимость работ по МСМ.

Составной частью подземного приемного пункта является вновь разработанный скважинный сейсмический датчик, обеспечивающий оперативную установку и закрепление трехкомпонентных сейсмических приемников на основе геофонов GS-One [4] в шпуров диаметром 48 – 76 мм глубиной до 7 – 10 м.

В конструкции скважинного сейсмического датчика применен пневматический привод прижима, а сам узел прижима выполнен на основе инициатора поперечного гидроразрыва химически активными составами, разработанного в ИГД СО РАН в рамках проекта RFMEFI60414X0096. Унификация узлов скважинного оборудования снизила стоимость разработки экспериментального образца АПК МСМ.

Общий вид скважинного сейсмического датчика АПК МСМ показан на рис. 4. Скважинный сейсмический датчик состоит из скважинного прибора А1 и двух устройств для его установки в скважину: азотного баллона малого объема с газовым редуктором и манометром и тестера угла наклона.

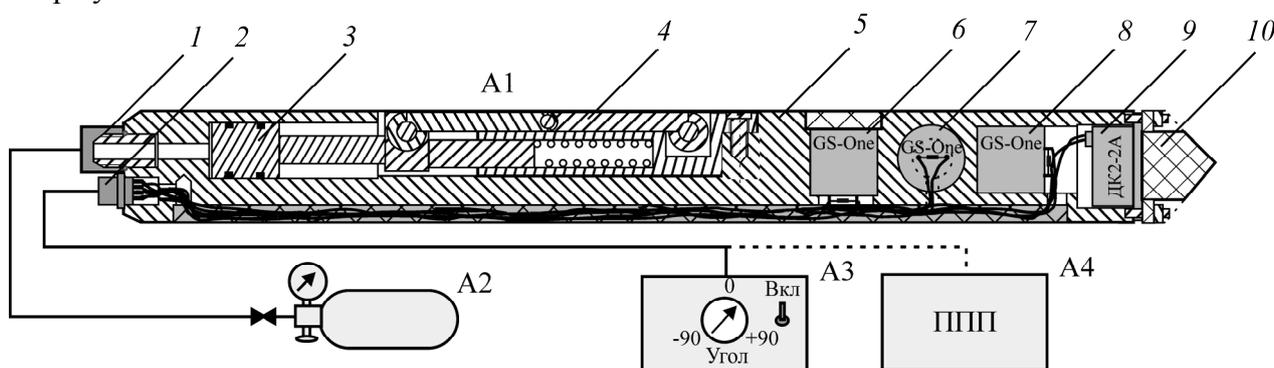


Рис. 4. Общий вид скважинного сейсмического датчика АПК МСМ: А1 — скважинный прибор: 1 — электрический разъем; 2 — входной штуцер пневматической системы; 3 — пневматический привод узла прижима; 4 — узел прижима; 5 — корпус; 6 — сейсмический приемник Z-компоненты МСМ колебаний; 7 — сейсмический приемник X-компоненты МСМ колебаний; 8 — сейсмический приемник Y-компоненты МСМ колебаний; 9 — датчик угла наклона; 10 — защитный колпак; А2 — азотный баллон малого объема с газовым редуктором и манометром; А3 — тестер угла наклона; А4 — полевой сейсмический модуль SCOUT подземного пункта приема (ППП)

Корпус скважинного прибора диаметром 40 мм и длиной 400 мм выполнен из стали, содержит входные разъемы для подсоединения электрических линий 1 и пневматического рукава высокого давления 2.

Комбинированная комплексная схема скважинного сейсмического датчика АПК МСМ приведена на рис. 5. Установку прибора в скважину выполняют с помощью составной досылочной штанги (на рисунке не показана), которая служит для ручной подачи прибора в скважину и его поворота вокруг своей оси. После досылки прибора в скважину на заданную глубину электрический кабель К1 прибора подключают к тестеру угла наклона и по показаниям вольтметра из его состава со шкалой, градуированной по углу наклона от -90° до $+90^\circ$, устанавливают прибор в рабочее положение, в котором приемник Z-компоненты МСМ колебаний направлен вертикально.

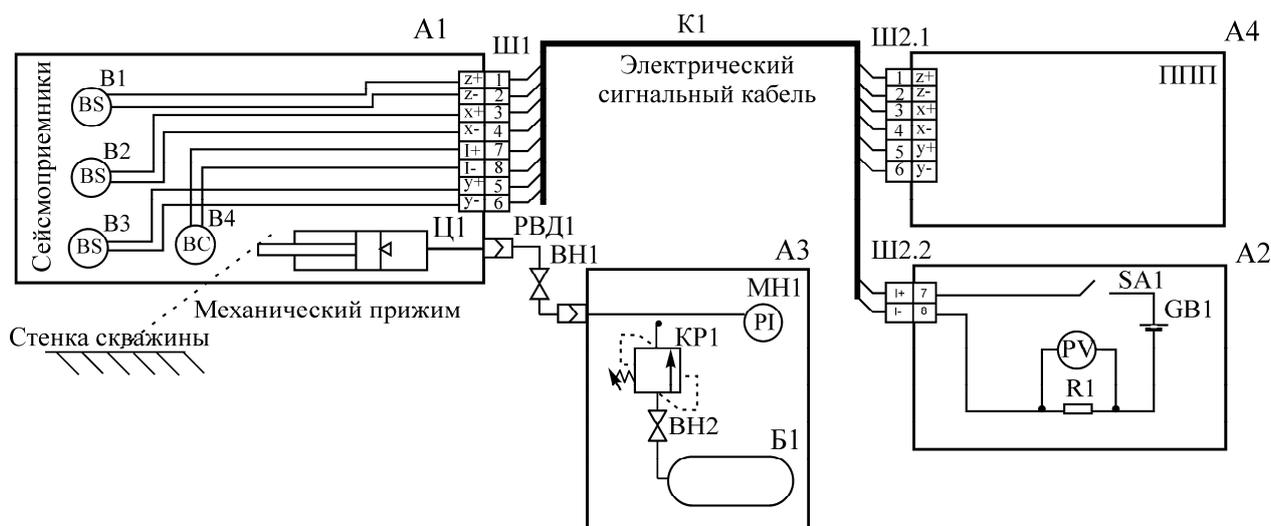


Рис. 5. Схема электрическая и пневматическая функциональная, соединений и подсоединения скважинного сейсмического датчика АПК МСМ: А1 – скважинный прибор: В1–В3 — сейсмические приемники; В4 — датчик угла наклона; Ц1 — пневматический привод узла прижима; А2 — тестер угла наклона: SA1 — тумблер; PV — вольтметр; R1 — измерительное сопротивление токовой петли; GB1 — гальваническая батарея; А3 — пневматический источник: ВН1, ВН2 — пневматические вентили; КР1 — газовый клапан-регулятор выходного давления; Б1 — баллон емкостью 3 дм³ с азотом сжатым до давления 20 МПа; А4 — полевой сейсмический модуль SCOUT; К1 — кабель электрический сигнальный (4 пары в экране); РВД1 — рукав высокого давления с диаметром проходного сечения 6мм; Ш1, Ш2 — электрические разъемы

После поворота прибора в рабочее положение к пневматической линии прибора (РВД1) подключают азотный баллон с газовым регулятором, давление на выходе которого устанавливают по показаниям манометра МН1 в диапазоне 1–3 МПа, что обеспечивает прижим прибора к стенке скважины с усилием 200–600 Н. При необходимости усилие прижима может быть увеличено.

После прижима прибора досылочную штангу извлекают из скважины, отключают тестер угла наклона и пневматический источник, а сам прибор соединяют кабелем К1 с ППП — полевым сейсмическим модулем SCOUT шахтного исполнения.

Координаты подземного пункта, определенные маркшейдерской службой горнодобывающего предприятия, заносят в оперативную память полевого модуля SCOUT (присвоение координат расстановки подземной приемной антенны) по каналу Wi-Fi с помощью переносного защищенного планшетного компьютера, в котором установлено программное обеспечение “SCOUT-Сервис”. С помощью указанного планшетного компьютера проводят также диагностирование полевых сейсмических модулей и подключенных к ним геофонов (или сейсмогрупп), тестируя следующие параметры: коэффициент усиления ППП, шум приемного тракта ППП, смещение нуля приемного тракта ППП, взаимные влияния каналов ППП, подавление синфазных помех приемным трактом ППП, состояние внутренней памяти ППП, состояние батареи ППП, сопротивление геофонов; изоляция кабеля геофонов, наклон (затир катушки геофонов), смещение нуля, уровень микросейсм.

После прохождения указанных тестов проверяется связь подземного пункта приема ППП с компьютером АРМ МСМ, тестируется и настраивается система синхронизации по протоколу IEEE 1588.

После успешного прохождения всех тестов подземный пункт приема МСМ принимается в работу.

Использование скважинного сейсмического прибора разработанной конструкции оптимально по трудозатратам, материалам и технологичности установки. По сравнению, например, с аппаратурой GITS разработки ВНИМИ [5, 6] значительно ниже диаметр контрольных скважин (шпуров) и затраты на их бурение, не требуется установка и цементирование обсадной трубы и крупногабаритного датчика.

В отличие от полевых сейсмических модулей ИПСМ аппаратуры “Микон-Гео” (ТУ 4314-001-44645436-2011) [7] чувствительность приема микросейсмических колебаний у разработанного скважинного датчика АПК МСМ выше в 3 раза, глубина установки увеличена с 0.5 до 7–10 м, что снижает уровень техногенного шума и существенно повышает эффективность выделения и локации слабых микросейсмических событий.

Наиболее близким аналогом разработанного комплекса АПК МСМ является сетевая система сейсмического мониторинга СССМ [8] ТОО “Элгео” (Казахстан), в которой, в отличие от АПК МСМ:

а) скважинный датчик не оборудован узлом прижима, не предусмотрена его установка в протяженные горизонтальные шпуры;

б) приемная антенна состоит из отдельно расположенных наземных и подземных пунктов приема, а не из антенных групп, как в АПК МСМ, что повышает затраты на создание наземной системы сбора данных МСМ из-за использования большого количества клиентских станций беспроводной сети Ethernet средней и большой дальности передачи данных. В АПК МСМ используется менее затратное двухуровневое построение наземной системы сбора данных из антенных групп, связанных между собой по Wi-Fi. Клиентские станции беспроводной сети Ethernet используются для связи антенных групп с центром сбора данных МСМ;

в) система СССМ имеет не регулируемый интервал дискретизации аналогово-цифровых преобразователей в 2 мс, в то время как полевые модули SCOUT обеспечивают установку периода квантования от 0.25 до 4 мс, что расширяет функциональные возможности аппаратуры.

Отметим, что близость параметров промышленных сейсмических телеметрических регистраторов различных производителей обусловлена однотипными современными схемными решениями и элементной базой, применением цифровых сигнальных процессоров.

Разработанный аппаратно-программный комплекс микросейсмического мониторинга ориентирован на применение комбинированных (наземных и подземных) высокочувствительных систем наблюдения, возможность контроля геодинамических явлений не только по локации и оценке энергий сейсмических событий, но и по изменению скоростной анизотропии горных пород, определяемой по результатам анализ волновых полей от источников микросейсмических событий.

ВЫВОДЫ

Разработаны технические решения сбора микросейсмических данных, обеспечивающие повышение информативности микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых, в том числе по числу приемных каналов, охвату контролируемого объема породного массива пунктами приема, оптимизации условий приема отношения сигнал/шум.

Разработанные аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов обеспечивают интеграцию наземной и подземных приемных антенн в единый комплекс с единым форматом записи данных и формированием массива однородных данных для последующего редактирования и обработки.

Разработан скважинный сейсмический прибор для оперативной установки трехкомпонентных сейсмических приемников в скважины (шпур) диаметром 48–76 мм на глубину до 10 м от борта горной выработки с усилием прижима к стекам скважины до 600 Н.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система беспроводной информационной инфраструктуры SBGPS [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.granch.ru/> (дата обращения 27.11.2014).
2. Бескабельная сейсмосистема SCOUT [Электронный ресурс]. — URL: <http://skbsp.ru/index.php/ru/sejsmosistemy/beskabelnaya-sejsmosistema-scout> (дата обращения 27.11.2014).
3. Blackfin Embedded Processor ADSP-BF512/BF514/BF514F16/BF516/BF518/BF518F16 [Электронный ресурс]. — URL: http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADSP-BF512_514_514F16_516_518_518F16.pdf (дата обращения 11.05.2015).
4. Геофон GS-ONE [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.geospace-ufa.ru/catalog/geofony/gs-one.html> (дата обращения 27.11.2014).
5. Презентация GITS [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.vnimi.ru/hardGITS.php> (дата обращения 24.11.2014).
6. 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 // ГИАБ. — 2012. — № 5.
7. Система локального и регионального контроля и прогноза состояния горного массива “МИКОН-ГЕО” [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.ingortech.ru/produktsiya/statsionarnye-sistemy/paragraf-41-pb/kontrol-gornogo-massiva-p-41-pb> (дата обращения 28.05.2015).
8. Сетевая система сейсмического мониторинга CCCM ТОО “Элгео” [Электронный ресурс]. — URL: <http://www.elgeo.kz/newssm.shtml> (дата обращения 27.11.2014).

Поступила в редакцию 29/V 2015