

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 544 + 550.3 + 551 + 622 + 681:624.1

### ОТ ЯВЛЕНИЯ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ РЕАКЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ — К ВОЛНАМ МАЯТНИКОВОГО ТИПА В НАПРЯЖЕННЫХ ГЕОСРЕДАХ. Ч. II

**В. В. Адушкин<sup>1</sup>, В. Н. Опарин<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Институт динамики геосфер РАН,  
Ленинский проспект, 38, 119334, г. Москва, Россия;  
<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия  
<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлен аналитический обзор научных исследований и технических разработок по созданию уникальных комплексов приборов и оборудования для моделирования и регистрации в натуральных условиях нелинейных упругих волн и сопутствующих электромагнитно-эмиссионных процессов в напряженных массивах горных пород блочно-иерархического строения. Достигнутые за минувшее десятилетие результаты совместных экспериментальных и теоретических исследований ряда ведущих научных организаций РАН и ее региональных отделений, ведущих вузов страны в рамках выполнения междисциплинарных интеграционных проектов создают методологическую и приборно-измерительную базу для построения новых перспективных систем комплексного геомеханико-геофизического мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов на рудниках и шахтах России — уникальных природных “лабораторий” для фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле.

*Массив горных пород, блочно-иерархическое строение, нелинейные геомеханические процессы, приборно-измерительные системы, землетрясения, горные удары, взрывы, подземные выработки, борта карьеров, волны маятникового типа, сейсмособытия, система геомеханико-геодинамической безопасности*

#### ВВЕДЕНИЕ

В первой части настоящей статьи [1] основное внимание было уделено экспериментальному доказательству существования явления знакопеременной реакции горных пород на взрывные воздействия разной мощности и описанию первых механико-математических моделей для его объяснения.

Открытие и изучение этого явления в 70–80-е годы минувшего века сделано с использованием скважинных геофизических, а также геодезических методов, не позволявших в то время

---

Работа выполнена по проекту ОНЗ РАН 3.1 и Интеграционному проекту партнерских фундаментальных исследований СО РАН № 100.

детально в пространстве и времени проследить собственно процесс перехода контролируемых участков массивов горных пород из “начального” механического состояния в “конечное” при реализации взрывов (в динамическом режиме).

Такие возможности появились лишь во второй половине 90-х годов XX столетия с созданием базовой модификации многоканального оптоэлектронного деформометра продольного типа МОЭД-1п для регистрации динамических смещений геоблоков породного массива вдоль скважин разной ориентации [2]. К началу текущего столетия он был успешно испытан на рудниках Норильского месторождения полиметаллов в экспериментальных работах по детальным исследованиям особенностей развития квазистатических и динамических (деформационно-волновых) процессов в окрестностях подземных выработок, проходимых буровзрывным способом. При этом удалось охватить измерениями как непосредственно примыкающую призабойную зону, так и окрестный массив на удалениях от эпицентров технологических взрывов до 50 м и более [3, 4].

### 1. ПРИБОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МОЭД-1П И ПЕРВЫЕ ЗАПИСИ ВОЛН МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Следует отметить, что значительное влияние на инициирование целенаправленных систематических исследований и технических разработок по нелинейным деформационно-волновым процессам в массивах горных пород блочно-иерархического строения оказала публикация [5]. Здесь на примере анализа особенностей распространения упругих волновых пакетов в “одномерных” блочных средах была выделена сравнительно низкоскоростная (~ 300 м/с) группа сейсмических волн от импульсных источников, получившая название волн маятникового типа.

Их динамико-кинематические характеристики (в том числе амплитудно-периодный спектр) уже непосредственно связывались с вещественными носителями — структурными элементами (блоками) модели геосреды, колеблющимися в стесненных условиях по типу связанных между собой нелинейно-упругими элементами “физических маятников”. Дальнейшее развитие экспериментов с привлечением сейсмических записей от технологических взрывов отражено в [6–8].

Результаты исследований показали, что для непосредственной регистрации волн маятникового типа необходимо разрабатывать принципиально иные приборно-измерительные комплексы, учитывающие не только линейные размеры структурных элементов геосреды (вещественных носителей этих волн), но и амплитудный диапазон их относительных смещений в динамическом режиме. **Сейсмические датчики в этом отношении, если и способны регистрировать маятниковые волны, то только в модулированном виде сейсмических записей на существенно более поздних вступлениях [5, 9] в сравнении с продольными и поперечными волнами. Для этого требуется разработка специальных алгоритмов сканирования записей общего сейсмического процесса от импульсных источников за весьма длительные промежутки времени — в зависимости от энергии и удаленности источников [10].**

Непосредственная регистрация маятниковых волн требует обоснованного выбора схемы, места и времени (!) натуральных наблюдений с учетом реального блокового строения массивов горных пород. Расположение измерительных датчиков линейных перемещений между контролируемыми геоблоками должно учитывать их реальные размеры. Ясно, что в случае попадания смежных измерительных датчиков в пределы одного “работающего” блока дает практически нулевую разность их показаний. Поэтому разные датчики измерительной системы, вообще говоря, должны располагаться в разных работающих блоках контролируемого объема горных пород.

По существу, отмеченное обстоятельство являет собой методологический рубеж между традиционно используемыми ныне контрольно-измерительными системами и технологиями обработки сейсмической информации и соответственно тем, что требуется для развития и применения теории волн маятникового типа.

Наглядной иллюстрацией тому служат первые работы в этом направлении с использованием базовой конструкции продольного многоканального скважинного деформометра оптоэлектронного типа МОЭД-1п [2–4]. Здесь ограничимся лишь примером, иллюстрирующим большое различие между записями упругих волновых пакетов, регистрируемых сейсмическим и деформационным каналами, от горного толчка, произошедшего на некотором удалении от горной выработки (рудник “Октябрьский” Норильского месторождения (рис. 1)).

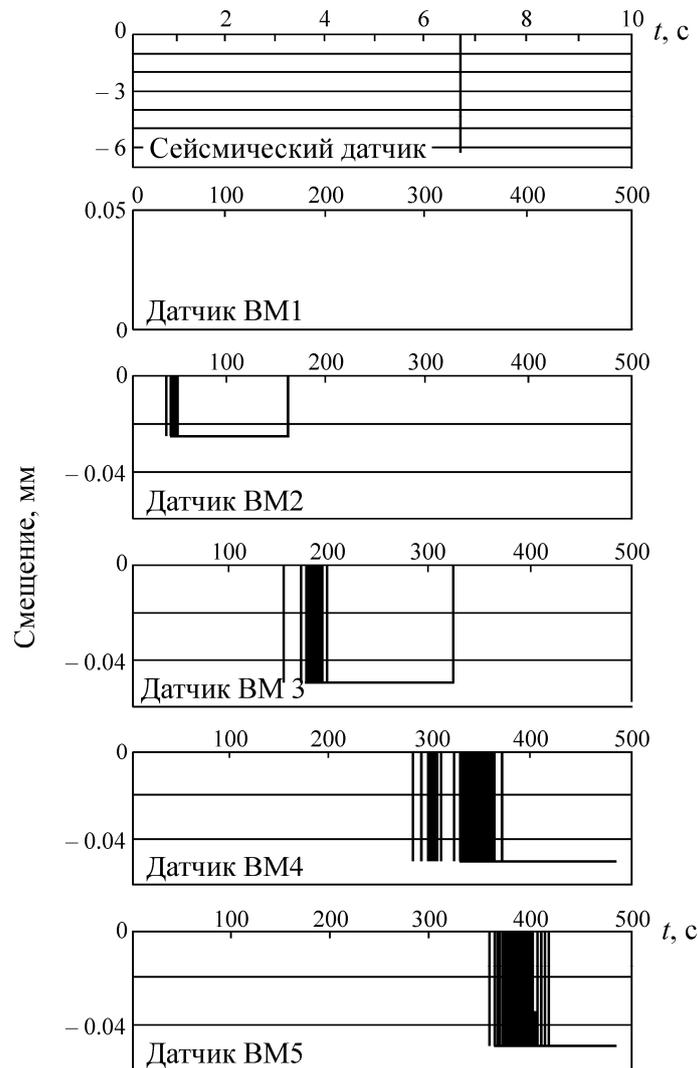


Рис. 1. Графики смещения датчиков по скважине В от горного толчка

Как видно из рисунка, в данном случае (расстояние между смежными датчиками ВМ равно 1.5 м; сейсмический канал совмещен с приборным комплексом МОЭД-1п) с начала регистрации сейсмодетонационным комплексом (“0”, с) первым зарегистрирован волновой пакет из продольных и поперечных волн, по сути — в “поляризованном” виде (~ 6.6 с).

Затем оптоэлектронными датчиками прибора МОЭД-1п (порядок удаления от контура выработки в глубь массива отвечает последовательности: ВМ1, ВМ2, ..., ВМ5) регистрируется приход медленной волны маятникового типа, начиная с “приконтурного” (ВМ1; ~ 40 с) к удаленному в глубь массива (ВМ5; ~ 360 с) — так же в “поляризованном” виде. Поскольку место локализации горного толчка в эксперименте заранее не было известно, кажущаяся скорость распространения маятниковой волны вдоль наблюдательной скважины (рис. 2) по годографу ее первых вступлений оценена диапазоном  $\sim 5 \div 8$  см/с. При этом скоростная зависимость регистрируемой волны с удалением от контура выработки качественно отражает поведение радиальной компоненты тензора напряжений вокруг подземной выработки. Направление движения маятниковой волны от контура выработки в глубь массива свидетельствует о том, что очаг горного толчка находился, вероятно, в непосредственно прилегающей приконтурной зоне. В работах [9, 11] лазерными деформографами ИЛФ СО РАН зарегистрированы от землетрясений в районе оз. Байкал маятниковые волны так называемого “квазиметрового” скоростного диапазона (0.43 – 1.76 м/с).

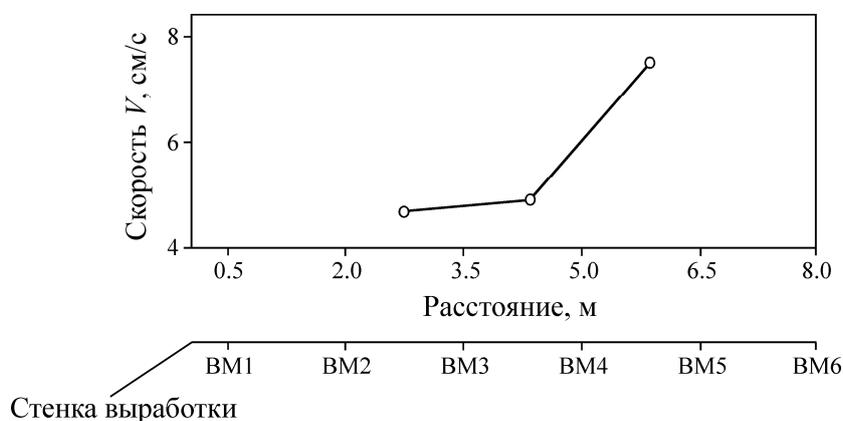


Рис. 2. Скорость распространения маятниковой волны

## 2. СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРИБОРНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И МЕТОДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Отмеченные выше проблемные позиции нелинейной геомеханики и связанный с ними большой круг задач с 2003 г. легли в основу цикла комплексных фундаментальных и прикладных исследований, а также технических разработок в рамках интеграционных проектов с участием специалистов разного профиля (от горняков и геофизиков до создателей нового поколения приборов, а также математиков и механиков-теоретиков). Это представители из почти 20 организаций — академических институтов РАН и ее региональных отделений, Национальных академий наук Украины и Киргизии, ведущих вузов Новосибирска и Томска [12 – 16].

К важнейшим направлениям (проектам) такого междисциплинарного сотрудничества относились:

1) разработка методов и создание уникального комплекса приборов и оборудования для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород (2003 – 2005 гг.) [12];

2) исследования на базе новых достижений в области научного приборостроения по “Современной геодинамике массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования” (2003 – 2005 гг.) [13];

3) разработка методов и создание систем сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов (2006–2008 гг.) [14, 15];

4) исследования на базе синтеза экспериментальных и теоретических разработок по глобальной геодинамике и “техногенной” геомеханике, связанные с “Деструкцией земной коры и процессами самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия” на примере крупнейших горнодобывающих регионов России (2009–2011 гг.) [16].

Начиная с 2012 г. накопленный за минувшее десятилетие опыт объединения научного и кадрового потенциала участников отмеченных проектов позволил сконцентрировать основное внимание в очередной трехлетний период на реализации комплексного интеграционного проекта по направлению “Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах” (2012–2014 гг.).

Следует особо отметить, что упомянутыми интеграционными проектами по существу положено начало реализации более общей идеи авторов — **создания фундаментального задела для формирования многослойной геоинформационно-мониторинговой системы “Геомеханико-геодинамической безопасности России»**, состоящей из трех базовых геоинформационных слоев: *подземного, наземного и надземного*.

Ясно, что без совместного и взаимообусловленного рассмотрения динамики твердой, жидкой и газообразной оболочек тектонически активной Земли невозможно строить стратегию развития подобной системы безопасности огромной территории России и мира, в том числе и для горнодобывающих областей.

Динамика развития горнодобывающего комплекса России и мира за минувшее столетие привела к качественно новой ситуации, когда “локальные” геомеханические поля, индуцируемые техногенной деятельностью человека, уже не являются пренебрежимо малыми в сравнении с глобальными геодинамическими полями тектонически активной Земли, в том числе и самой верхней ее оболочки [13–17].

Следовательно, рассматривая шахты и рудники как уникальные природные лаборатории, широко представленные по поверхности континентов земного шара, где можно детально исследовать во взаимосвязи геомеханические и геодинамические процессы инструментальными горно-геофизическими и спутниковыми геодезическими методами, естественной представляется идея “синхронизации” и “геообъектной привязки” геомеханической информации к глобальной геофизической и геодезической. В России она в значительной мере представлена “Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений”, находящейся под эгидой Геофизической службы РАН и МЧС России [18].

С активным развитием спутниковой геодезии и геофизики в последние десятилетия уже появились реальные возможности для включенности и этого геоинформационного слоя атмосферной и приповерхностной оболочек Земли в будущую глобальную систему геомеханико-геодинамической безопасности России. Для этой объединяющей идеи имеются веские основания в виде наработанного к настоящему времени большого объема фактического материала разноплановых экспериментальных исследований, теоретических разработок и обобщений в области геомеханики, геофизики и геотектоники [11–23].

К важнейшим методологическим выводам этих исследований следует отнести [13, 22] следующие:

1) основными свойствами геосреды являются ее блочно-иерархическое строение и постоянное колебательное движение структурных элементов горного массива. Экспериментальные наблюдения свидетельствуют о практически повсеместной распространенности разнопериодных циклических вертикальных и горизонтальных движений геоблоков разного масштабного уровня;

2) подвижность земной коры и ее проницаемость для жидкости и газов обусловлены наличием трещин, соразмерных отделяемым ими геоблокам соответствующего иерархического уровня. Речь идет о “локализованном” характере динамического деформирования геосреды, наличии активных массообменных процессов в межблоковых трещинных пространствах и ярко выраженном проявлении эффекта аномально высокой тензочувствительности геофизических полей в зонах сопряжения геоблоков по всей их иерархии;

3) основными энергетическими источниками движения структурных элементов геосреды и ее геосфер в целом являются тепло недр Земли (тектонические силы), лунно-солнечные приливы (вообще — гравитационные приливы от планет Солнечной системы), атмосферное давление и техногенная деятельность человека.

Отмеченная “триада” — неперемное условие, обеспечивающее взаимосвязь энерго- и массообменных процессов между геосферами Земли, а также космическим пространством.

Далее, с необходимостью в “сжатом” виде, отметим основные достижения современных исследований по ряду выделенных в [12–15] направлений, иллюстрирующих позиции 1–3, акцентируем внимание на нерешенных проблемах.

В данной части статьи основной акцент сделаем на современных тенденциях развития и достижениях в таком базовом направлении экспериментальной геомеханики, как научное приборостроение.

### **3. ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ В ОБЛАСТЯХ С СИЛЬНЫМИ ТЕХНОГЕННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

Опишем основные результаты совместной разработки перспективных приборных комплексов участников отмеченных выше интеграционных проектов в направлении горно-геофизического научного приборостроения [12, 14, 24], связанного с созданием новых измерительно-вычислительных комплексов, в том числе и для “бесконтактного» электромагнитного мониторинга. Последний нередко может рассматриваться в горном деле и как навигационный при выборе безопасных мест для выполнения абсолютных измерений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород известными геомеханическими методами в подземных горных выработках, поскольку повышенный электромагнитно-эмиссионный фон, как правило, приурочен к тектоническим разломам (в том числе и “скрытого” типа) либо к участкам массивов повышенной удароопасности. И в том и в другом случае необходимое для этих методов бурение скважин или разгрузочных щелей может привести к фатальным последствиям.

**3.1. В ИГД СО РАН совместно с НГТУ разработан прибор РЭМИ-4 для контроля разрушения горных пород в натуральных условиях подземных горных выработок с обеспечением непрерывной записи измеряемых сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне частот до 1 МГц [14, 25, 26].**

В состав прибора входит магнитная антенна с усилителем, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) для преобразования измеряемого сигнала в цифровой код, контроллер и интерфейс USB для передачи информации в компьютер ПК (рис. 3). Устройство обеспечивает непрерывную запись сигналов ЭМИ в течение 6 ч.

### Технические характеристики прибора РЭМИ-4

Чувствительность антенны при отношении сигнал/шум 40 дБ	6 мВ/м
Выходное напряжение антенны, соответствующее напряженности электрического поля 6 мВ/м	10 мкВ
Рабочий диапазон частот антенны	10 Гц – 1 МГц
Нелинейность частотной характеристики на частоте 1 кГц	≤ 1 дБ
Разрядность АЦП	10
Интервал усреднения показаний на индикаторе	1 с
Частота дискретизации регистратора	200 Гц
Объем энергонезависимой памяти	8 Мб
Тип компьютерного интерфейса	USB
Время непрерывной регистрации	5 – 8 ч
Рабочий температурный диапазон	– 5... + 30°С
Масса с элементами питания (аккумуляторы)	300 г

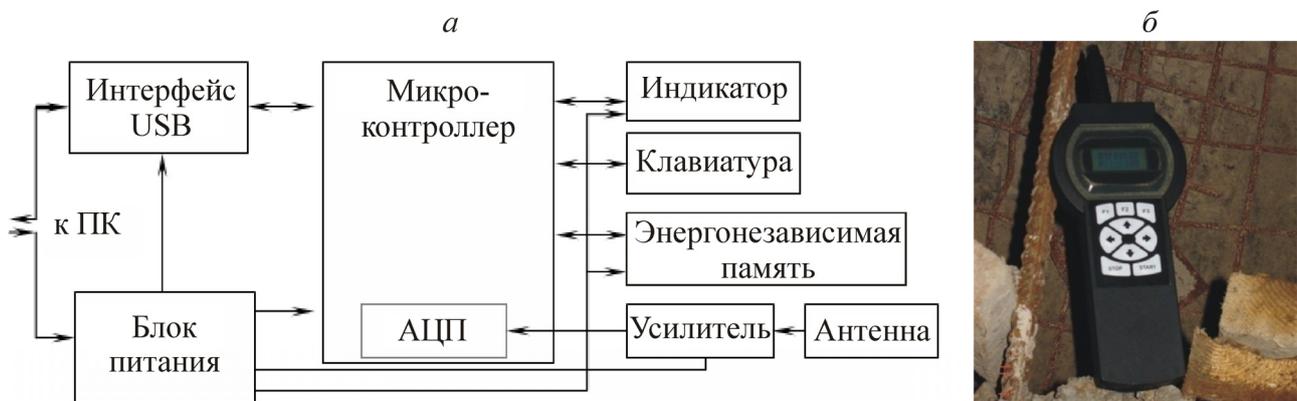


Рис. 3. Структурная схема прибора РЭМИ-4 для ЭМИ-диагностики разрушения в массивах (а) и внешний вид его прототипа (б)

**3.2. Для расширения технических возможностей скважинного электрометрического зонда ЗЭМИ-1 в ИГД СО РАН разработан блок преобразования и записи регистрируемых сигналов электромагнитной эмиссии в цифровом виде [14, 27].**

Зонд ЗЭМИ-1 предназначен для регистрации сигналов ЭМИ в напряженном массиве горных пород по глубине с использованием скважин диаметром 110 мм и более. Конструкция зонда ЗЭМИ-1 доработана применительно к исследованию ЭМИ в условиях карьера. Прибор позволяет подключать приемную антенну магнитного или емкостного типа. В дополнение к имеющемуся регистратору аналогового типа РЭМИ-2 [14] разработан канал цифрового преобразования для передачи измеряемого сигнала в компьютер. Усовершенствованный регистратор снабжен устройством индикации цифровой информации о напряженности электромагнитного поля в зоне измерений, а также каналами звуковой и световой сигнализации. Дооснащение зонда ЗЭМИ-1 цифровым каналом существенно расширяет возможности измерений сигналов ЭМИ по глубине скважины и позволяет накапливать информацию в компьютере с использованием канала дистанционной передачи данных.

**3.3. В ИГД СО РАН проведены исследования деформаций контура измерительной скважины от влияния изменений температур при бурении возмущающей скважины, обоснована принципиальная схема построения автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса и разработан модифицированный скважинный деформо-**

**метр повышенной чувствительности, обеспечивающий повышение надежности и достоверности экспериментальных оценок величин, действующих в массиве напряжений, методом параллельных скважин [28–31].**

На основе анализа технических и программных решений для автоматизации экспериментов разработано техническое задание на создание измерительно-вычислительного комплекса для реализации метода параллельных скважин. Автоматизация процесса регистрации и обработки данных при исследовании напряжений осуществляется с использованием программно-технических средств, разработанных с учетом особенности выполнения эксперимента и обеспечивающих визуализацию измеряемых параметров [28, 29].

Для реализации принята трехуровневая схема построения технических средств: датчики первичной информации (тензорезисторный деформометр, датчик давления, датчик расхода жидкости) — блок первичной обработки данных (модули фирмы Advantech) — персональный компьютер (Notebook). С целью увеличения соотношения сигнал/шум в конструкции скважинного деформометра (рис. 4) предусмотрено использование 400-омных полумостов на тензорезисторах, что позволяет получать более надежные результаты при малых значениях измеряемых деформаций.



Рис. 4. Скважинный деформометр

Условием повышения достоверности определения величин напряжений в массиве является учет влияния температурных воздействий в процессе бурения возмущающей скважины, поскольку различие температур промывочной воды и массива приводит к деформациям измерительной скважины, не связанным с его напряженным состоянием.

На основе решения квазистатической задачи термоупругости [30, 31] исследовано влияние изменений температурного поля на смещения контура измерительной скважины. Дана оценка влияния времени бурения и расстояний между скважинами на результаты замеров. Для геометрических параметров эксперимента, принятых в методе параллельных скважин, установлено, что в случае разницы температур промывочной воды и массива более 5°C необходим учет температурного фактора. Контроль изменения температуры на контуре измерительной скважины при заданных параметрах эксперимента (геометрия и взаимное расположение скважин, время бурения и температура промывочной воды) позволит вносить температурные поправки в измеренные деформации.

**3.4. В ИГД СО РАН разработаны программно-технические средства автоматизации измерений и обработки данных при определении напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин [28, 29]. Программный комплекс выполнен в среде графического программирования LabView, включающего все необходимые средства для автоматизации, визуализации и графического отображения данных в реальном времени и их математической обработки. Проведены лабораторные испытания измерительно-вычислительного комплекса на всех этапах эксперимента, осуществлена проверка работоспособности программных средств и надежности регистрации контролируемых параметров.**

В соответствии с разработанным принципом трехуровневого построения измерительно-вычислительного комплекса для автоматизации, регистрации и обработки данных измерений напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин (рис. 5а) в качестве измерительных устройств первого уровня используются:

- 4-канальный деформометр, в котором радиальные измерения смещений контура измерительной скважины осуществляются с применением 400-омных тензорезисторов;
- датчик давления фирмы JUMO для измерений нагружения стенок возмущающей скважины равномерным давлением.

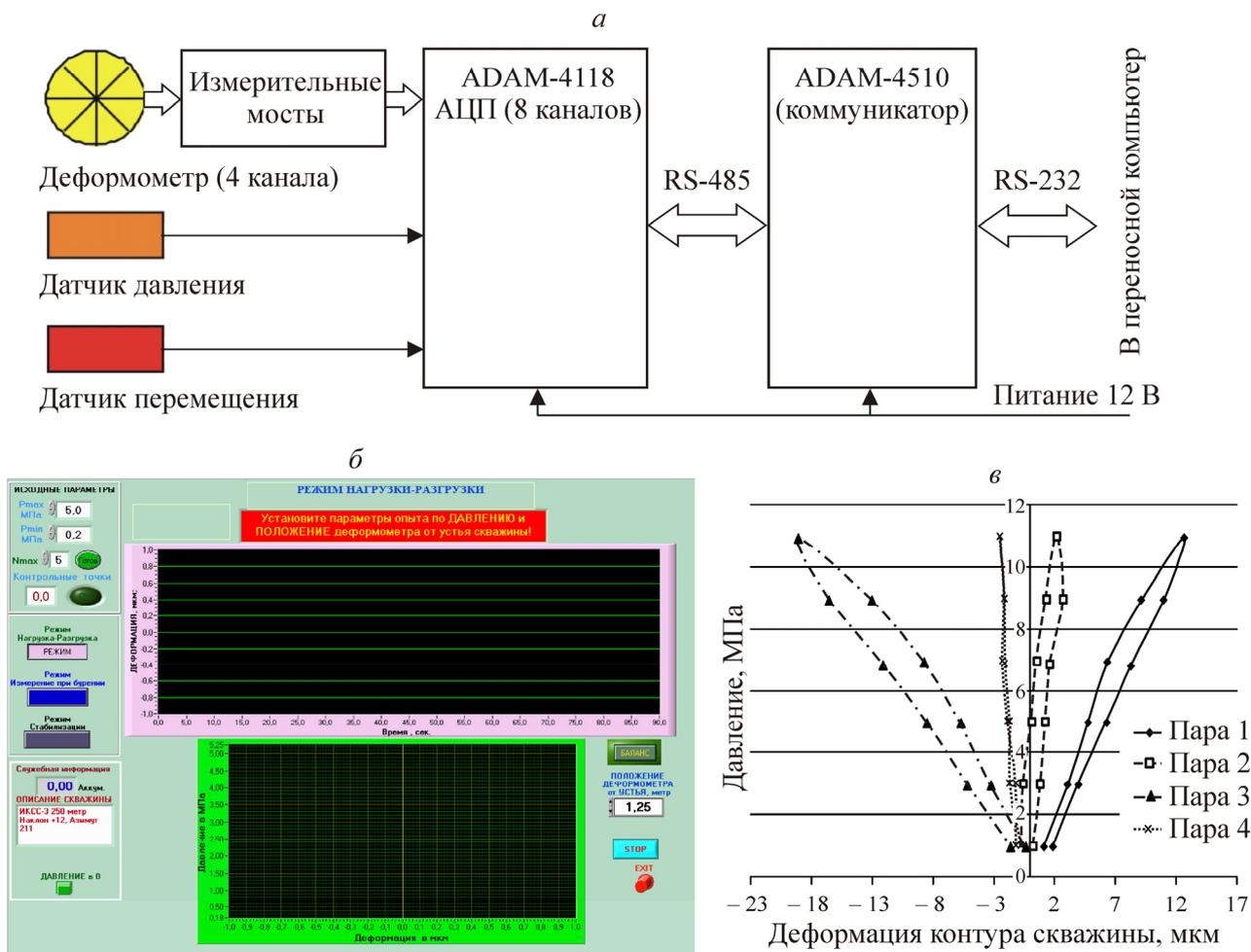


Рис. 5. Блок-схема устройства регистрации (а), экранная форма отображения эксперимента при бурении возмущающей скважины (б) и отображение на экране дисплея результатов эксперимента по нагружению возмущающей скважины (в)

Программный комплекс построен по модульному принципу, выполнен в среде графического программирования LabView и позволяет автоматизировать процесс получения экспериментальных данных при реализации метода. Подготовка комплекса к проведению эксперимента сводится к подключению разъемов датчика давления и деформометра к устройству регистрации и осуществлению следующих подготовительных процедур:

- калибровка датчиков (проводится в лабораторных условиях в случае обнаружения отклонений показаний прибора от эталонных значений или в случае замены датчиков);

- ввод исходных данных, характеризующих условия проведения эксперимента;
- контроль стабилизации показаний деформометра после его установки в скважину.

После подготовительных процедур задается тип эксперимента: бурение возмущающей скважины (I), ее нагружение (II) или полный цикл, объединяющий оба варианта. При этом предусмотрены два режима выполнения эксперимента: автоматический и ручной. В автоматическом режиме данные регистрируются в заданных пределах (по времени — для типа I, по заданному верхнему и нижнему пределам давления — для типа II); опыт заканчивается автоматически при достижении заданных значений. В ручном режиме задается начальное значение времени или давления, а окончание опыта определяется экспериментатором в зависимости от результатов хода эксперимента, отображаемого на экране дисплея в виде графиков “деформация – время” (тип I) или “деформация – давление” (тип II).

При испытаниях комплекса проверена работоспособность его программно-технических средств на всех этапах эксперимента, кроме этапа выбуривания скважины. При калибровке деформометра, выполненной в тарировочном устройстве, установлена точность измерений радиальных смещений (1 мкм). Программный модуль “Параллельные скважины” (бурение скважины) открывает экранную форму, позволяющую в графическом виде контролировать процесс стабилизации показаний деформометра и последующее изменение радиальных смещений контура измерительной скважины при выбуривании возмущающей скважины (рис. 5б). Испытание комплекса в режиме нагружения возмущающей скважины в блоке с отверстиями, моделирующими геометрические параметры эксперимента, позволило определить время стабилизации показаний деформометра (20 мин с момента его установки в блоке) и зависимость “нагрузка – деформация” при проведении двух циклов “нагрузка – разгрузка” (рис. 5в).

**3.5. В ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН разработан 4-канальный скважинный продольный деформометр, предназначенный для измерения смещений геоблоков в массиве пород через скважину. Принципиальными отличиями прибора от ранее созданных являются: использование в измерительных модулях опор повышенной жесткости с механическим приводом крепления к стенке скважины, штанг для передачи перемещений геоблоков к измерительным датчикам типа угол-код, размещение датчиков в отдельном блоке, устанавливаемом в устье скважины [32].**

Прибор разработан на основе абсолютного датчика угловых положений и предназначен для непрерывных прецизионных измерений смещений геоблоков в массивах горных пород и определения деформаций в геосредах с естественной и наведенной структурой (зоны дезинтеграции, тектонические разломы, разрушаемые горным давлением и взрывами, породные целики, закладочные массивы и т. д.) через скважину (рис. 6), а также может использоваться для наблюдения за перемещением несущих конструкций инженерных сооружений (плотины, насыпи, тоннели, горные отвалы и т. д.). Основное применение — для исследования механизма распространения низкоскоростных деформационных волн (маятникового типа) и контроля их распространения при техногенных воздействиях от взрывов и горных ударов по системе геоблоков  $C_1 - C_i$  (см. рис. 6) в приконтурной части породных массивов подземных выработок рудников и шахт. Здесь  $i$  — порядковый номер геоблока в структуре массива по глубине скважины, считая от борта выработки.

Зоны дезинтеграции могут определяться экспериментально как путем визуального осмотра скважин при помощи погружной видеокамеры с определением глубин фактического залегания трещин и их систем в теле массива, так и с помощью выделения границ зон по характерным

вывалам и обрушениям пород в результате проявлений горного давления. В обоих случаях для количественного описания блочно-иерархического строения массива наиболее удобно использовать полу- или билогарифмическую шкалу с основанием  $\sqrt{2}$  ( $A \vee \log_{\sqrt{2}} A \leftrightarrow x \vee \log_{\sqrt{2}} x$ ;  $A = f(x)$ , где  $A$  и  $x$  — некоторые нормированные специальным образом  $f$ -функционально связанные величины) [14]. Получаемая по экспериментальным данным расчетная шкала линейных размеров блоков достаточно четко отражает возможные границы зон дезинтеграции по глубине массива в приконтурной части выработки, что служит основанием для выбора базовых размеров измерительной штанги по глубине установки деформометра в скважине и расстановки измерительных модулей в границах контролируемых геоблоков  $C_1 - C_i$  (рис. 6).

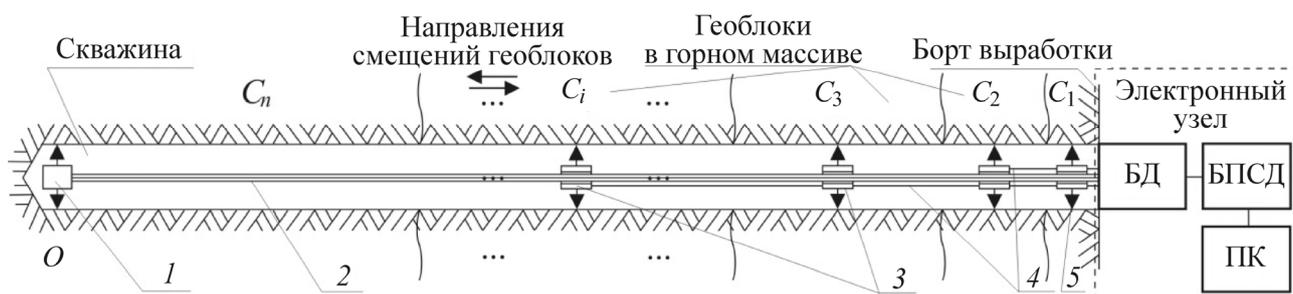


Рис. 6. Функциональная схема 4-канального скважинного продольного деформометра

В рассматриваемой конструкции деформометра интервалы глубин разрушения (табл. 1) по максимумам количества вывалов данного размера, попадающих в билогарифмическую шкалу с основанием  $\sqrt{2}$ , использованы для выбора базовой длины измерительной штанги и расстановки измерительных модулей для контроля медленных сдвигов геоблоков по глубине массива (Норильское месторождение).

ТАБЛИЦА 1. Интервалы глубин разрушения  $h$ , зафиксированные при динамических проявлениях горного давления (рудники Норильского месторождения)

$h$ , м	0.3*	0.5	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2	2.5	3	3.5	4	6	7	8
Количество	2	8	4	1	1	12	3	1	9	1	3	12	4	7	1	3	1	1	1

\* Размер определен для штанг.

Диапазон измерений датчика можно выбирать, используя известное соотношение между величинами раскрытия трещин и диаметрами отделяемых ими блоков в структуре горного массива, которые описываются функцией статистического распределения, близкого к нормальному [9]:

$$\mu_{\Delta}(\delta) = \frac{\delta_i}{\Delta_i} = \Theta \cdot 10^{-2} \text{ (для любого } i), \quad (1)$$

где  $\delta_i$  — среднее “раскрытие” трещин (расстояние между их берегами);  $\Delta_i$  — диаметр блоков  $i$ -го иерархического уровня; коэффициент  $\Theta$  наиболее часто попадает для любого  $i$  в интервал 0.5–2.0, т. е.  $\Theta \in (0.5 - 2.0)$ . Под “раскрытием” трещин в общем случае понимается ширина как собственно раскрытия трещин, возникающих при образовании дефектов в геоматериалах, так и зон дробления пород вокруг тектонических разломов различного масштабного уровня (зоны слабосцепленных между собой фракций пород).

Реальное раскрытие трещин в (1) обычно на один-два порядка меньше в напряженных массивах горных пород. Так, по данным маркшейдерских служб рудников Норильского месторождения, известно, что характерные глубины вывалов горных пород в бортах выработок варьируют в большинстве случаев в пределах от 0.5 до 2.0–2.5 м, достигая иногда 3–4 и даже 8 м (как правило, в кровле выработки). Принимая глубину вывала за линейный размер отделяемого блока, можно использовать соотношение (1) при оценке величин “раскрытия” трещин. Для указанных размеров эти “раскрытия” будут варьировать от 2.5 мм при  $\Theta = 0.5$  до 80 мм при  $\Theta = 2$ . Ограничиваясь  $\Theta = 1$  и учитывая, что отделение блоков на глубину более 4 м происходит крайне редко, раскрытие трещин может составлять от 2.5 до 40 мм. В соответствии с этим диапазон измерений датчика можно принять равным от 0 до 40 мм, что, как показали эксперименты на рудниках Норильска, является приемлемым по техническим характеристикам измерительных устройств.

Скважинный деформометр представляет собой сборную конструкцию, состоящую из четырех однотипных устанавливаемых на центрально расположенной продольной секционированной измерительной штанге измерительных модулей с выдвижными разжимными опорами для крепления к стенке скважины, что обеспечивает достаточную жесткость и надежность сцепления с породой, рассчитан на автономную работу в автоматическом режиме в скважинах глубиной до 16 м, снабжен аккумулятором, микропроцессором и встроенным блоком памяти, что позволяет работать без компьютера. Глубину установки якоря измерительной штанги можно увеличить путем вставки дополнительных секций. Механические узлы и детали (кроме блока датчиков), помещаемые в скважину, выполнены из нержавеющей стали и допускают эксплуатацию в химически агрессивной среде.

Состав прибора (рис. 6): базовый якорь 1 (репер), измерительная штанга 2, четыре измерительных модуля 3, четыре измерительных тяги 4, блок датчиков БД, блок питания и сбора данных (БПСД), компьютер ПК. Внешний вид измерительного модуля показан на рис. 7а. Усилие прижима выдвижных опор 5 якоря (рис. 6) и измерительных модулей к стенке скважины рассчитано на 500 кГс и выбрано из условия исключения проскальзывания контактной накладке опоры вдоль стенки при ускорении порядка 10g при взрывах, где g — ускорение свободного падения, 9.81 м/с. Привод опор — механический, с помощью пары винт–гайка. Вращение винта обеспечивается соответствующей измерительной тягой. Для исключения люфтов при сборке и измерениях все сочленения в муфтах и стяжках выполнены конусными. Для свободного перемещения по скважине при монтаже вся конструкция установлена на колесные пары. Зазор свободного прохода в сечении скважины при установке составляет 5 мм по радиусу.

Блок датчиков (рис. 7б) служит для преобразования перемещений измерительных модулей относительно якоря в цифровой код и устанавливается в устье скважины. Корпус 1 блока датчиков крепится на штанге якоря цангой 2, удерживаемой зажимом 3. Перемещение тяги при помощи рычага 4 и шкива 5 преобразуется в поворот датчика угол-код 6. В качестве датчиков используются абсолютные угловые датчики типа ЛИР-ДА-113А. Сигналы датчиков преобразуются процессорной платой 7 в двоичный код, передаются в блок БПСД, где происходит накопление данных. Корпус блока датчиков защищает электронные компоненты от механических воздействий при установке в скважине. Ресурс аккумулятора обеспечивает автономную работу в течение 7 сут. Считывание информации в компьютер может осуществляться через стандартный порт USB как непосредственно при измерениях, так и после отключения и доставки блока БПСД в удобное для перезаписи место. Внешний вид 4-канального скважинного продольного деформометра показан на рис. 7в, его технические характеристики даны в табл. 2. Испытательный монтаж прибора в скважине выполнен в карьере “Ложок”, Новосибирская обл.

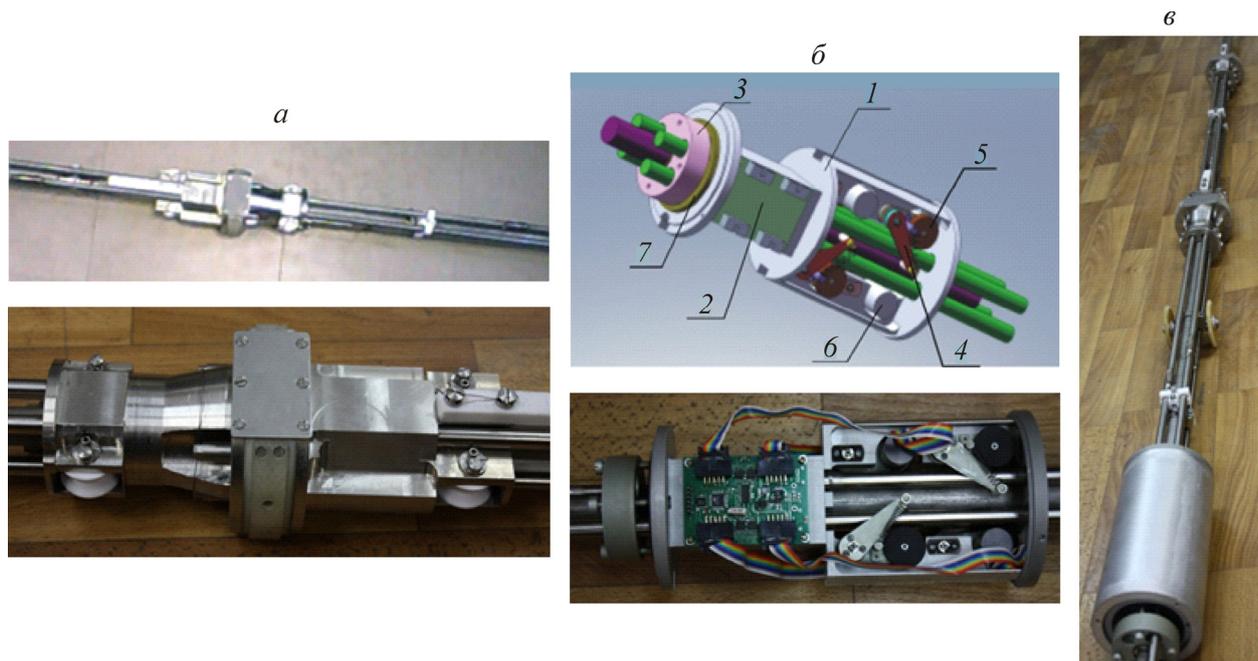


Рис. 7. Измерительный модуль (а), модуль датчиков (б) и внешний вид прибора для деформационных измерений в массиве через скважину (в). Пояснения в тексте

ТАБЛИЦА 2. Технические характеристики 4-канального скважинного продольного деформометра, показанного на рис. 6, 7

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм	110
Глубина измерительной скважины, м	16
Длина измерительной штанги от якоря до блока датчиков, мм	16000
Количество каналов измерений, шт.	4
Интервалы установки измерительных модулей относительно репера, мм	
измерительный модуль 1	14750
»          »          2	13500
»          »          3	11000
»          »          4	7250
Диапазон измерений перемещений измерительным модулем, мм	0 – 40
Дискретность измерений, мм	0.01*
Погрешность измерений, мм	± 0.005*
Предельная скорость измерений при перемещении объекта, мм/с	1000**
Период обновления результатов измерений, мкс	100
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	4.5 ... 5.5
Ток потребления, мА	До 500
Габаритные размеры блока датчиков, мм	Ø 100×350
Масса блока датчиков, кг	2.5
Габаритные размеры блока питания и сбора данных, мм	50×150×300
Масса блока питания и сбора данных, кг	3.0
Степень защиты от внешних воздействий	IP50

\* Параметр определен по результатам метрологических испытаний.

\*\* Паспортная характеристика датчика.

**3.6. В ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН разработаны принципы построения и структура распределенной многопроцессорной системы мониторинга сейсмодеоформационно-электромагнитных процессов при проявлениях горного давления в блочных породных массивах с использованием скважин [34].**

Основными факторами, определяющими развитие современных систем измерений в горном деле на рудниках и шахтах с использованием персональных компьютеров, локальных сетей и программно совместимых с компьютерами IBM PC промышленных контроллеров, имеющих сетевые интерфейсы, являются: снижение стоимости IBM PC при одновременном росте их вычислительной мощности и надежности; широкий выбор компактных, мощных и относительно дешевых микроконтроллеров промышленного назначения, электронных дисков памяти большой емкости; развитие сетевых технологий и создание на их основе архитектуры гибких распределенных мобильных модульных систем контроля и сбора данных. Современные системы мониторинга имеют типовую архитектуру, которая включает следующие уровни: блоки регистрации измерительных данных; устройства связи с объектом; свободно программируемые контроллеры (встроенные промышленные компьютеры); автоматизированное рабочее место оператора; средства связи и автономного электропитания.

Станции глубинных реперов, многоканальные продольные деформометры, скважинные электрометрические зонды типа ЗЭМИ-1, автономные сейсмические станции с блоками типа “Байкал” и “Ангара”, мобильные сейсмические станции типа “Лакколит”, зонды для измерений поперечных деформаций в сечении скважин на основе оптико-поляризационных датчиков по сути представляют собой локальные распределенные подсистемы радиального типа с блоками сбора соответствующей измерительной информации о состоянии блочных массивов горных пород. Поэтому общие тенденции построения автоматизированных систем на основе промышленных сетей (типа Industrial Ethernet) и распределенных вычислительных мощностей хорошо согласуются с задачами **сейсмодеоформационно-электромагнитного мониторинга** горных массивов в условиях рудников и шахт для повышения безопасности их эксплуатации и применения современных технологий разработки месторождений полезных ископаемых. При создании таких систем необходимо учитывать получение больших объемов измерительных данных, требующих значительных ресурсов на хранение и затрат времени на обработку в процессе наблюдений.

Структура комплексной системы сбора сейсмодеоформационно-электромагнитных данных представлена на рис. 8.

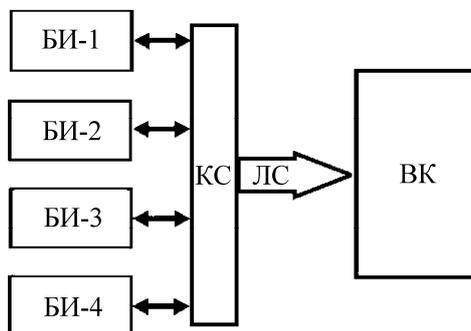


Рис. 8. Структурная схема системы измерений и обработки данных сейсмодеоформационно-электромагнитного мониторинга на основе многоканальных приборных комплексов

В состав системы входят четыре многоканальных приборных блока измерений и регистрации данных: БИ (БИ-1 — 4-канальный скважинный продольный деформометр, БИ-2 — скважинный электрометрический зонд, БИ-3 — сейсмическая станция с блоками типа “Байкал” и

“Ангара”, БИ-4 — зонд для измерений деформаций в поперечном сечении горизонтальной скважины); канал синхронизации КС; линия связи ЛС; компьютер ВК. При необходимости общее количество измерительных датчиков в комплексных приборных блоках БИ может наращиваться. На первом этапе опробования системы режим совместных измерений в реальном времени обеспечивается существующей архитектурой представленных подсистем. В развитие системы сейсмодеформационно-электромагнитного мониторинга отметим следующие базовые подсистемы.

**3.6.1. В ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН разработана подсистема контроля деформационно-электромагнитных процессов в блочных массивах горных пород на основе двух приборов: 3-канального продольного деформометра для измерения смещений геоблоков в массиве с закреплением измерительных модулей по почве выработки и зонда для измерения сигналов электромагнитной эмиссии в породах как через скважину, так и при установке в нише выработки. Синхронизация каналов регистрации параметров деформирования и сигналов электромагнитной эмиссии обеспечивается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [32, 33].**

Подсистема, схема которой показана на рис. 9, функционально состоит из двух измерительно-регистрирующих блоков: БИ-1а — 3-канальный скважинный продольный деформометр в составе трех измерительных модулей, оснащенных абсолютными оптоэлектронными датчиками положения аналогового типа ДПА; БИ-2 — скважинный электрометрический зонд с датчиком ДЭМИ (электрическая или магнитная антенна) и усилителем для регистрации сигналов электромагнитной эмиссии в массиве горных пород.



Рис. 9. Функциональная схема измерительной подсистемы контроля деформационных и электромагнитно-эмиссионных процессов в массиве горных пород

В состав деформометра входит измерительный зонд и электронный узел. Зонд включает в себя базовый якорь 1 с прикрепляемой измерительной штангой 2, подвижные относительно штанги измерительные модули 3, снабженные опорами 4, которые устанавливаются по почве выработки, где определены тектонические разломы. Механические узлы и детали деформометра выполнены из нержавеющей стали с учетом возможности длительной эксплуатации в химически агрессивной среде рудника и соответствуют требованиям по взрывозащите. Конструктивно зонд состоит из взаимозаменяемых секций трубной конструкции, соединяемых винтовыми муфтами, что позволяет изменять его длину и схему измерений в зависимости от размеров геоблоков и подключать до 4 измерительных модулей. В этом случае электрометрический зонд не используется. Датчики ДПА конструктивно установлены в подвижных опорах деформометра, соединительные проводники проложены в трубных секциях измерительной штанги.

Сигналы с датчиков ДПА блока БИ-1а поступают на первые три входа 4-канального АЦП. Сигналы с датчика ДЭМИ блока БИ-2 по кабелю 5 поступают на усилитель У и далее — на четвертый вход АЦП, который расположен в измерительном блоке БИ-1а. Преобразованные сигналы в цифровом виде передаются по линии связи ЛС в компьютер ПК. Длина линии может составлять 200 м. Для автономного питания используется аккумуляторный блок БП. Компьютер ПК запитан от преобразователя напряжения ПН. Синхронизация измерений обеспечивается одновременной обработкой аналоговых сигналов в АЦП.

Для монтажа измерительных зондов в массиве по почве подземной выработки выделяют геологические разломы, определяют размеры контролируемых геоблоков и выбирают схему расстановки датчиков продольного деформометра. В местах установки датчиков и базовой опоры в породе закрепляют жесткие опоры, на которых монтируется зонд деформометра. Одновременно бурят скважину для электрометрического зонда и устанавливают его с помощью досылочной штанги б, выполненной из трубчатых секций, соединяемых при помощи механических муфт. Это позволяет варьировать глубину установки зонда и компоновать систему с учетом конкретных схем измерений смещений геоблоков и регистрации сигналов электромагнитного излучения в контролируемом массиве. В качестве варианта электрометрический зонд может размещаться в нише подземной выработки.

Технические характеристики 4-канального продольного деформометра даны в табл. 3, электрометрического зонда — в табл. 4. Прибор был испытан в натуральных условиях.

ТАБЛИЦА 3. Технические характеристики 4-канального деформометра

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм	110
Глубина измерительной скважины, м	16
Длина измерительной штанги от якоря до блока датчиков, мм	16000
Количество каналов измерений, шт.	4
Интервалы установки измерительных модулей относительно репера, мм	
измерительный модуль 1	15000*
»      »      2	14000*
»      »      3	12000*
»      »      4	8000*
Диапазон измерений перемещений измерительным модулем, мм	0–25
Дискретность измерений, мм	0.01**
Погрешность измерений, мм	± 0.005**
Предельная скорость измерений при перемещении объекта, мм/с	100
Период обновления результатов измерений, мкс	100
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	4.5 ... 5.5
Ток потребления, мА	До 500
Габаритные размеры блока АЦП, мм	30×100×200
Масса блока датчиков, кг	1.0
Габаритные размеры блока питания, мм	50×150×250
Масса блока питания, кг	3.0
Степень защиты от внешних воздействий	IP50

\* Взаимозаменяемость секций измерительных модулей и измерительной штанги допускает любую компоновку схемы измерений.

\*\* Параметр определен по результатам метрологических испытаний.

ТАБЛИЦА 4. Технические характеристики электрометрического зонда

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм (без ограничения по глубине)	110
Выходное напряжение антенны, соответствующее напряженности электрического поля 6 мВ/м, мкВ	10
Чувствительность антенны при отношении сигнал/шум 40 дБ, мВ/м	6
Рабочий диапазон частот антенны, кГц	0.01 – 250
Нелинейность частотной характеристики на частоте 1 кГц, дБ	≤ 1
Разрядность АЦП	10
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	4.5 ... 5.5
Ток потребления, мА	До 500
Габаритные размеры блока АЦП, мм	30×100×200

**3.6.2. В ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН разработана система контроля деформационно-волновых процессов в блочных геосредах на основе двух приборов: 3-канального продольного деформометра для измерения смещений геоблоков в массиве с закреплением измерительных модулей по почве выработки и зонда для измерения вибросейсмических колебаний как через скважину, так и при установке в нише выработки. Синхронизация каналов регистрации параметров деформирования и вибросейсмических сигналов обеспечивается с помощью АЦП [33, 34].**

Система, схема которой приведена на рис. 10а, функционально построена однотипно с представленной на рис. 9. В ее состав входят измерительно-регистрирующий блок БИ-1а — 3-канальный продольный деформометр, оснащенный оптоэлектронными датчиками положения аналогового типа ДПА; блок БИ-3 — скважинный измеритель механических колебаний с акселерометром ДУ и усилителем для регистрации вибросейсмических колебаний пород. Сигналы с датчиков ДПА блока БИ-1а поступают на входы 1–3 АЦП. Сигналы с акселерометра ДУ блока БИ-3 по кабелю 5 поступают на усилитель У и далее — на вход 4 АЦП, который конструктивно расположен в измерительном блоке БИ-1а.

Синхронизация измерений обеспечивается одновременной обработкой аналоговых сигналов в АЦП. Преобразованные сигналы в цифровом виде передаются по линии связи ЛС в компьютер ПК. Для автономного питания используется аккумуляторный блок БП. Прибор размещают в скважинах с учетом выбранной схемы измерений. Зонд блока БИ-3 устанавливают с помощью досылочной штанги б, выполненной из трубчатых секций.

Внешний вид продольного деформометра показан на рис. 10б, его технические характеристики даны в табл. 3, вибросейсмического канала — в табл. 5. Монтаж и испытания прибора в скважине выполнены в карьере “Ложок”, Новосибирская обл. (см. рис. 10в).

ТАБЛИЦА 5. Технические характеристики вибросейсмического канала

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм (без ограничения по глубине)	110
Рабочий диапазон частот, кГц	0.01 – 30
Разрядность АЦП	10
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	4.5 ... 5.5
Ток потребления, мА	До 500
Габаритные размеры блока АЦП, мм	30×100×200

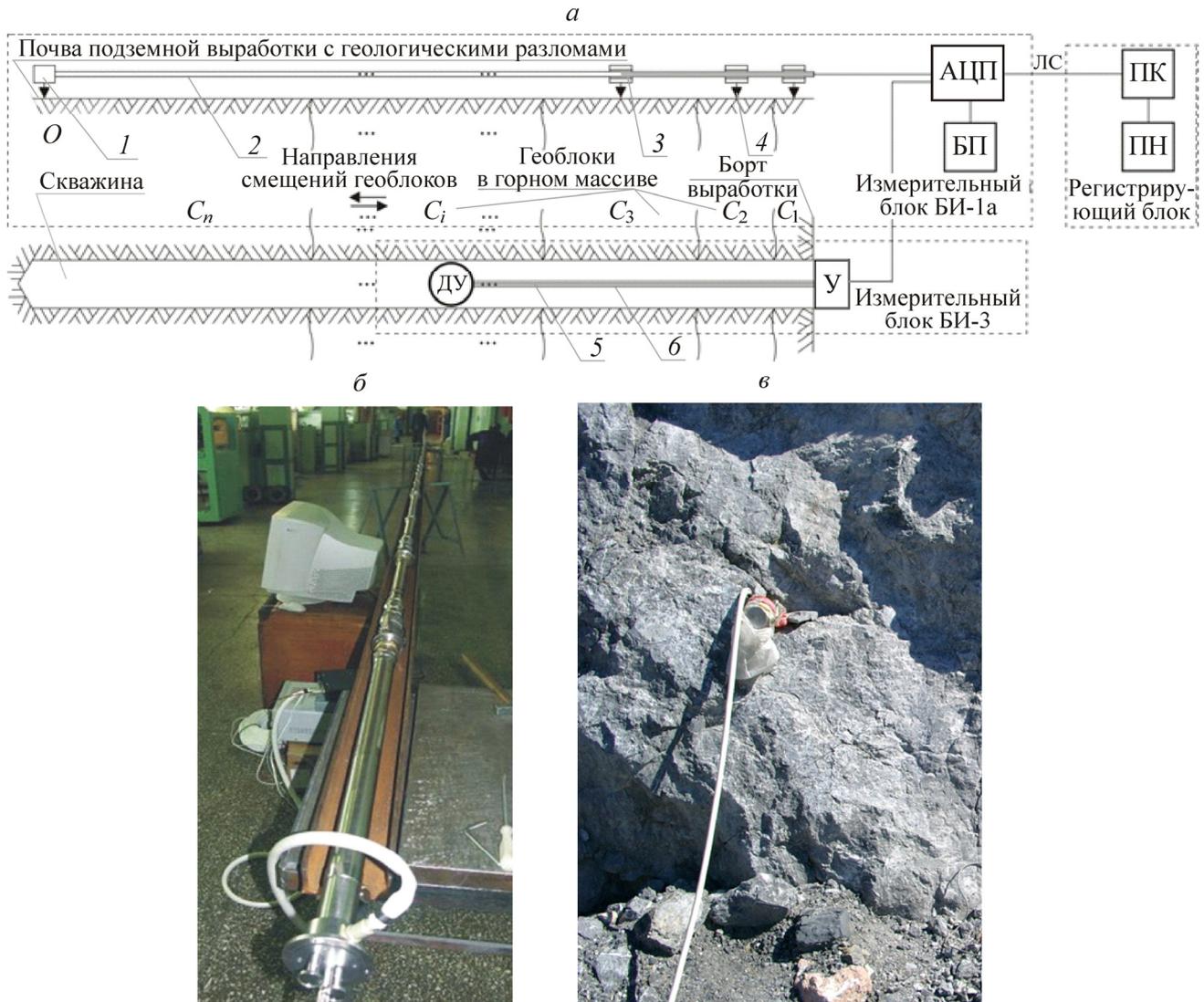


Рис. 10. Схема измерительной системы дистанционного мониторинга деформационно-волновых процессов в массивах горных пород (а) и внешний вид деформометра при лабораторных испытаниях на метрологическом стенде (б) и в скважине карьера “Ложок”, Новосибирская обл. (в)

**3.6.3. В ИГД СО РАН совместно с КТИ НП СО РАН разработана система контроля деформационно-электромагнитно-волновых процессов в массивах горных пород на основе 2-канального продольного деформометра для измерения смещений геоблоков с закреплением измерительных модулей по почве выработки, зонда для измерения электромагнитной эмиссии и зонда для измерения вибросейсмических колебаний в породах как через скважину, так и при установке в нише выработки. Синхронизация каналов регистрации деформирования, электромагнитно-эмиссионных и вибросейсмических сигналов обеспечивается с помощью АЦП [32, 33].**

Система, показанная на рис. 11, функционально построена однотипно с представленными в п. 3.6.1 (рис. 9) и п. 3.6.2 (рис. 10а). В ее состав входят измерительно-регистрирующий блок БИ-1б — 2-канальный продольный деформометр с оптоэлектронными датчиками аналогового типа ДПА, блок БИ-2 — скважинный электрометрический зонд с датчиком ДЭМИ и блок БИ-3 — скважинный измеритель вибросейсмических колебаний с акселерометром ДУ. Сигналы с

датчиков ДПА деформометра БИ-16, датчика ДЭМИ блока БИ-2 и акселерометра ДУ блока БИ-3 поступают на входы четырехканального АЦП. Преобразованные сигналы в цифровом виде передаются по линии связи ЛС в компьютер ПК.



Рис. 11. Схема измерительной системы мониторинга деформационных, электромагнитно-эмиссионных и вибросейсмических процессов в массивах горных пород

Синхронизация измерений обеспечивается одновременной обработкой аналоговых сигналов в АЦП. Для автономного питания блоков БИ-16, БИ-2 и БИ-3 используется аккумуляторный блок БП. Установка приборных комплексов осуществляется в скважинах с помощью досылочных штанг согласно выбранной схеме измерений. Система испытана при выполнении исследований деформационно-электромагнитно-волновых процессов в натуральных условиях.

**3.6.4. В ИГД СО РАН совместно с ИУУ СО РАН и КТИ НП СО РАН разработана 4-канальная наблюдательная станция глубинных реперов на основе микрометрического оптоэлектронного датчика положения индикаторного типа МЭУ-25 для контроля смещений и деформаций в породных массивах (в том числе отслоений пород в кровле горных выработок) через скважину. Датчик МЭУ-25 имеет канал синхронизации для обеспечения параллельной работы в составе группы из 8 датчиков. Передача информации осуществляется через порт USB [34].**

Наблюдательная станция, схема которой показана на рис. 12, предназначена для измерения смещений слоев и блоков горных пород в кровле подземных выработок рудников и шахт при проявлениях горного давления (при растрескивании пород, горных ударах, заколообразовании и т. д.) с помощью глубинных реперов, устанавливаемых в вертикальных скважинах, и функционально состоит из двух устройств: измерительного зонда и электронного блока регистрации. Измерительный зонд предназначен для вертикальной установки в скважине диаметром 45 мм (и более) и включает в себя комплект глубинных реперов 1 с прикрепленной к каждому реперу проволочной (струна) или стержневой тягой 2 для передачи смещений контролируемого геоблока в массиве на датчик, установленный в блоке регистрации 3. Каждый репер снабжен опорой 4, которая при монтаже зонда с помощью досылочных штанг (для струны) входит в сцепление со стенкой скважины. Для крепления блока датчиков к кровле выработки служит опорный конус.

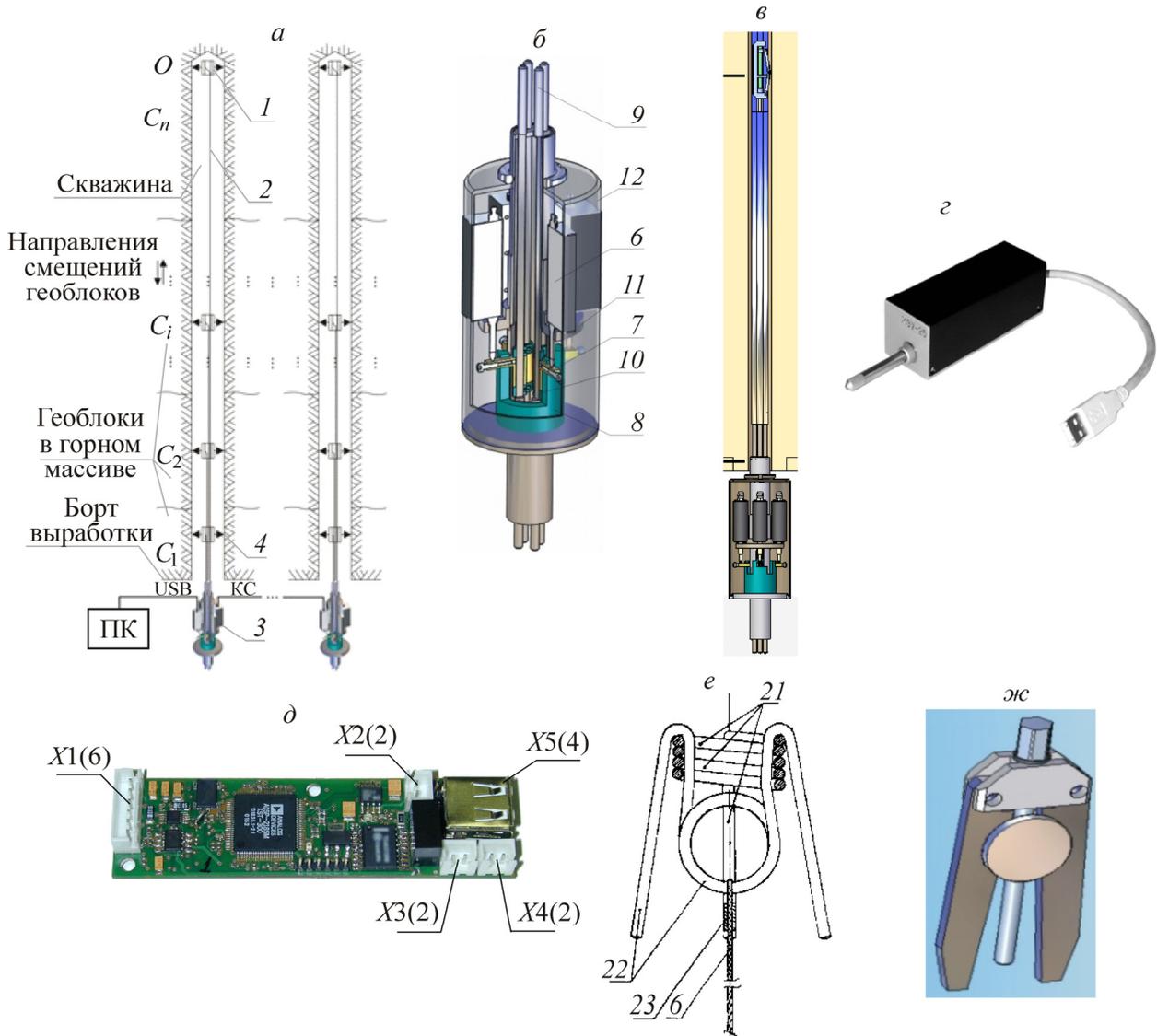


Рис. 12. Структурная схема группы 4-канальных станций глубинных реперов с каналом синхронизации (а); конструкция 4-канального блока регистрации (б); эскиз компоновки зонда для установки в вертикальной скважине Ø 45 мм (в); внешний вид (з) оптоэлектронного позиционно-чувствительного датчика МЭУ-25 и вид его электронной платы (д); пружинный репер по патенту № 2206740 РФ (е); лепестковый репер разработки ИГД СО РАН (ж): 1 — глубинный репер; 2 — тяга репера (струна или стержень); 3 — блок измерительных датчиков; 4 — жесткая опора (закреп) репера; 5 — опорный конус блока датчиков (на схеме не показан); 6 (б) — датчик положения МЭУ-25; 6 (в) — гибкая подвеска; 7 — нажимной упор в сборе с шариком и пружиной; 8 — кольцо осевой фиксации упора 7; 9 — набор тяг к опорам реперов; 10 — фиксатор упора 7; 11 — фланец крепления датчиков; 12 — корпус блока датчиков; 21 — кольца пружины; 22 — коромысло с седлом; 23 — обжимная втулка;  $C_1 - C_i$  — зоны дезинтеграции

Конструктивно зонд состоит из отдельных секций, что позволяет изменять его длину в зависимости от размеров скважины и подключать до 4 синхронно работающих каналов измерений. Стержневые и проволочные тяги выполняются секционированными и могут соединяться при помощи механических муфт. Это позволяет варьировать длину зонда и компоновать глубинную станцию с учетом конкретных схем измерений смещений геоблоков и отслоений пород в кровле контролируемого горного массива.

В состав блока регистрации (рис. 12б) входят: 4 микрометрических оптоэлектронных датчика положения 6 индикаторного типа МЭУ-25; нажимная лапка 7 в сборе с шариком, пружиной и винтом; кольцо 8 осевой фиксации лапки 7; тяга 9; установочный фиксатор 10 лапок; корпус 12 датчиков; фланец 11 крепления датчиков. Каждый датчик МЭУ-25 (см. рис. 12с) снабжен встроенным каналом синхронизации КС для совместной работы и позволяет подключаться к компьютеру ПК по линии связи канала USB. Это соответствует структуре деформационного мониторинга, представленной на рис. 8. Характеристики станции даны в табл. 6. Проведено испытание одноканального макета измерительного зонда с вертикально установленной струнной тягой.

ТАБЛИЦА 6. Технические характеристики наблюдательной станции

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм	45 и более
Глубина измерительной скважины, м	16*
Длина измерительной штанги от якоря до блока датчиков, мм	16000*
Количество каналов измерений, шт.	До 4
Интервалы установки измерительных модулей относительно репера, мм	Без ограничений
Диапазон измерений перемещений датчиком МЭУ-25, мм	0 – 25
Дискретность измерений, мм	0.01**
Погрешность измерений, мм	$\pm 0.005^{**}$
Предельная скорость измерений при перемещении объекта, мм/с	100
Темп измерений в секунду	До 900
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	4.5 ... 5.5
Ток потребления, мА	До 500
Габаритные размеры блока регистрации, мм	30×100×200
Масса блока датчиков, кг	1.0
Габаритные размеры блока питания, мм	50×150×250
Масса блока питания, кг	3.0
Степень защиты от внешних воздействий	IP50

\* Глубина скважины и соответственно длина измерительной штанги определяются возможностью предельного бурения при данном диаметре.

\*\* Параметр рассчитан по результатам метрологических испытаний.

Разработан также одноканальный продольный деформометр с датчиком МЭУ-25 со стержневой тягой для контроля смещений и отслоений пород при перераспределении напряжений кровли и образования вблизи контура выработанной площади краевых зон, находящихся под действием опорного давления при разработке пласта (рис. 13). Группу из 6 деформометров (рис. 13б, в) можно объединить в систему для измерений деформирования кровли по схеме на рис. 13а. Система позволяет устанавливать деформометры с интервалом 5 м (ограничение по длине канала связи с портами USB), снабжена автономным источником электропитания и в данной версии может работать с компьютером ноутбук. По результатам испытаний и привязки к конкретному объекту измерений планируется усовершенствовать схему электропитания и регистрации данных, осуществить подключение к линии связи для дистанционной передачи информации в компьютер, разработать искровзрывозащиту электронных компонентов.

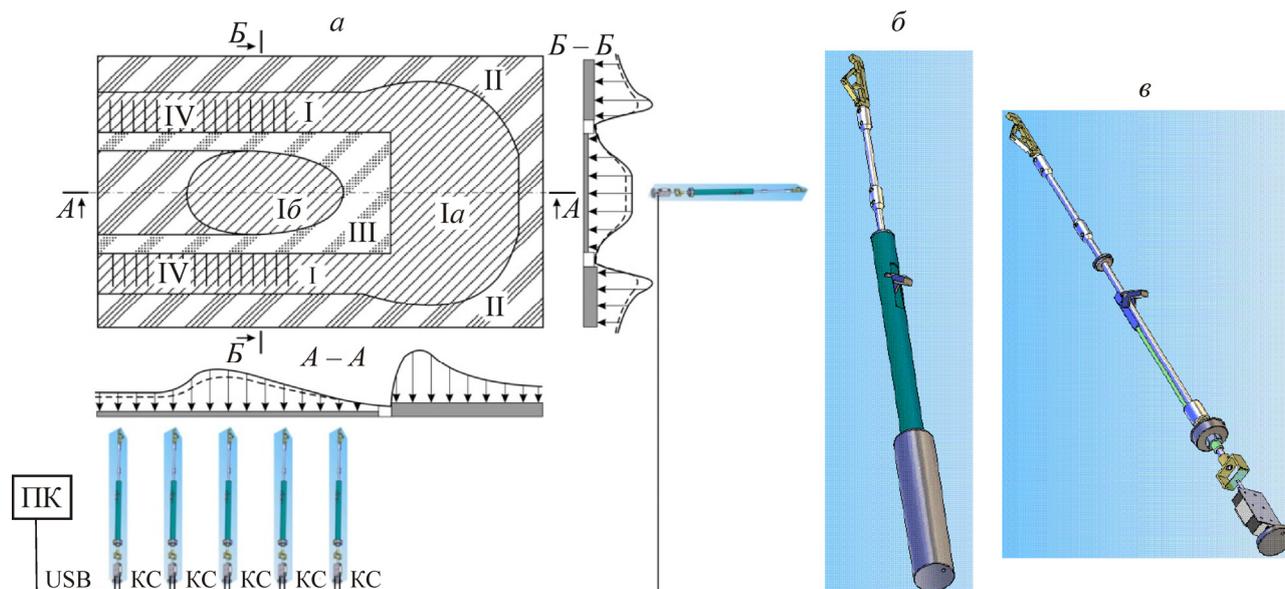


Рис. 13. Схема выделения зон опорного давления и перераспределения напряжений в породах кровли подземной выработки, действующего по контуру обнажения, совмещенная со схемой измерений деформирования кровли с помощью 6 одноканальных продольных деформометров (а), эскиз внешнего вида (б) и конструктивное устройство (в) одноканального продольного деформометра на базе датчика положения МЭУ-25: I — зона постоянного опорного давления, шириной 15–50 м; Ia — зона временного опорного давления впереди очистного забоя шириной 20–50 м, которая перемещается с продвижением очистного забоя; Ib — зона опорного давления в пределах выработанного пространства; II — зона, не затронутая сдвижением, напряжение не претерпевает изменений; III — зона пониженных напряжений — над призабойным пространством, в зоне раздавливания пород впереди очистного забоя и около подготовительных выработок; IV — зона разгрузочных скважин; КС — канал связи длиной до 5 м между соседними деформометрами

**3.7. В ИГД СО РАН совместно с филиалом ИФП–КТИ ПМ СО РАН разработана измерительная станция для контроля поперечных деформаций горизонтальных разгрузочных скважин в подземных выработках рудников и шахт на основе тензометрического зонда с поляризационными оптическими датчиками эллипсометрического типа и каналом синхронизации для работы в составе системы геомониторинга [35–38].**

В основу измерений механических напряжений, возникающих в массивах горных пород, положен метод контроля линейных изменений геометрических размеров поперечного сечения скважины при деформировании по трем направлениям, сдвинутым относительно друг друга на  $120^\circ$ . Для линейных изменений геометрических размеров поперечного сечения скважины при деформировании создан трехкомпонентный измерительный зонд (рис. 14а), в котором используются оптико-поляризационные датчики эллипсометрического типа, установленные по окружности под углом  $120^\circ$  [35].

По конструктивному исполнению зонд ориентирован на установку и опробован в скважинах диаметром от 105 до 165 мм с использованием сменных комплектов подвижных опор. На основе зонда разработана мобильная станция из группы синхронно работающих измерительных зондов для мониторинга деформирования разгрузочных скважин (рис. 14б), используемых для снижения напряжений в массиве горных пород при подземной добыче полезных ископаемых (медленные смещения при растрескивании, заколообразовании, горных ударах, обрушении пород и т. д.).

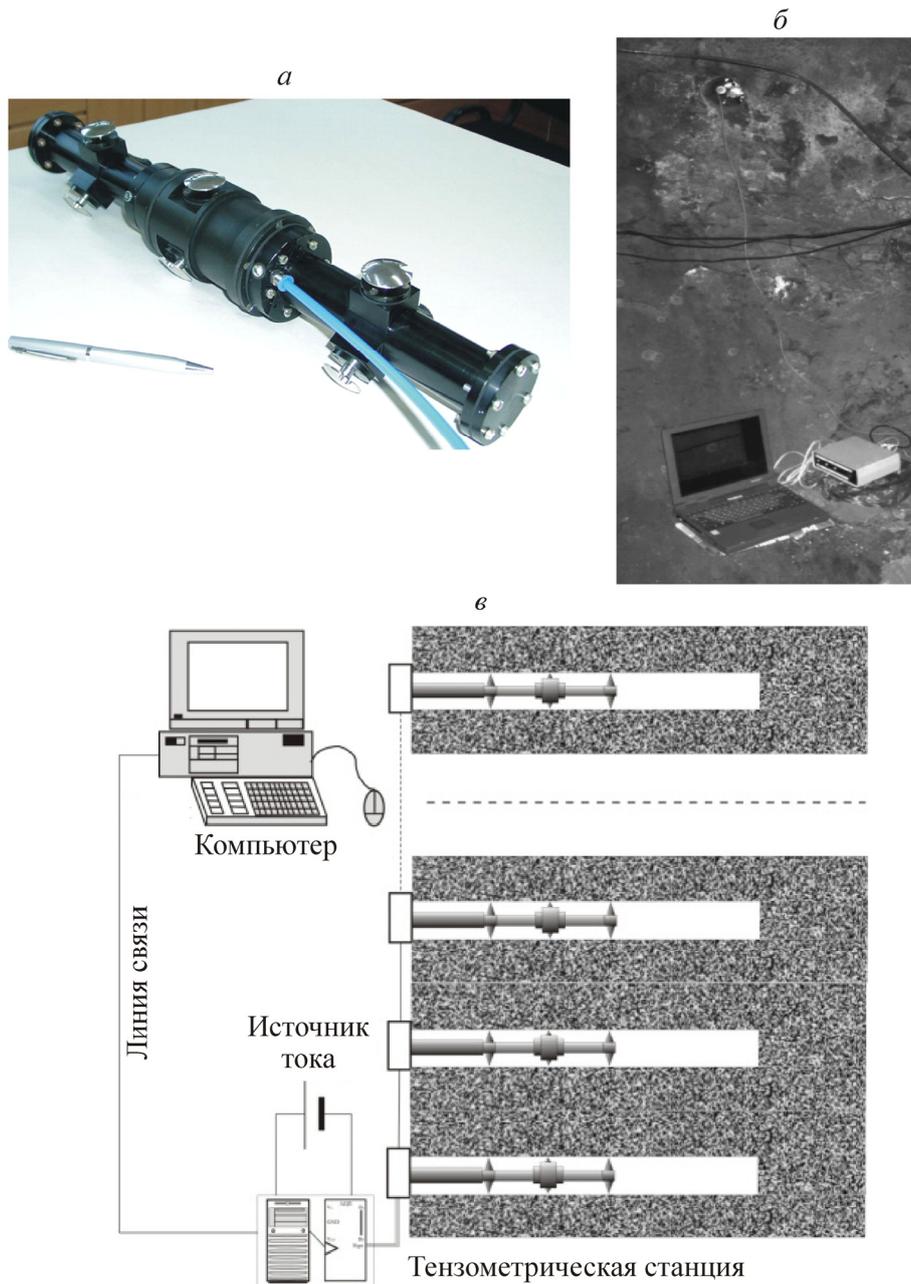


Рис. 14. Внешний вид измерительного тензометрического зонда (а); испытание зонда в скважине (б); структурная схема группы измерительных зондов с каналом синхронизации (в)

В состав станции для работы в условиях рудников входят: трехосевой измерительный зонд, микропроцессорный блок, компьютер и источник автономного электропитания. Микропроцессорный блок разработан с возможностью подключения к батарее стандартных шахтовых аккумуляторов, что позволяет проводить замеры, соблюдая существующие нормативы и требования техники безопасности при эксплуатации такого типа устройств в рудниках и шахтах (рис. 14б). Дополнительно разработан канал синхронизации оптико-поляризационных датчиков для работы в составе наблюдательной станции.

Использование станции в условиях рудников позволит оценить эффективность защитных мероприятий по разгрузке разрабатываемого массива в целях обеспечения безопасности веде-

ния подземных горных работ и рационального выбора схем добычи полезных ископаемых. Получаемые данные можно обрабатывать как в ходе эксперимента, так и после его завершения с возможностью вывода информации в табличном и графическом виде.

Трехканальная измерительная станция для контроля поперечных деформаций разгрузочных скважин, характеристики которой приведены в табл. 7, а внешний вид показан на рис. 14а, испытана в скважине.

ТАБЛИЦА 7. Технические характеристики 3-канальной измерительной станции для контроля поперечных деформаций горизонтальных разгрузочных скважин

Техническая характеристика	Параметр
Диаметр измерительной скважины, мм	От 85 до 165
Глубина установки блока датчиков, м	До 10
Количество каналов измерений, шт.	3
Диапазон измерений перемещений датчиком по одной оси, мм	0 – 7
Дискретность измерений, мм	0.01
Погрешность измерений, мм	$\pm 0.005$
Предельная скорость измерения при перемещении объекта, мм/с	100
Темп измерений в секунду	До 100
Интервал рабочих температур, °С	0 ... + 70
Напряжение питания, В	12 ... 14
Ток потребления, мА	До 100
Габаритные размеры измерительного зонда, мм	$\varnothing 85 \times 400$
Масса измерительного зонда, кг	2.5

**3.8. В ИЛФ СО РАН разработана стационарная сейсмическая станция ИСС-48, предназначенная для непрерывного мониторинга сейсмических сигналов естественного и искусственного происхождения на элементах конструкций инженерных сооружений и неразрушающего контроля этих сооружений [39].**

Станция представляет собой многоканальную систему сбора данных, синхронизированную сигналами точного времени. Конструктивно ИСС-48 состоит из: периферийных преобразовательных блоков (ППБ) типа “Байкал-112”, устанавливаемых вблизи сейсмических датчиков; центрального блока (ЦБ) “Ангара7-8L”; линий связи (ЛС); персонального компьютера (ПК). Электрические сигналы, пропорциональные сейсмическому воздействию на датчики, поступают через экранированный кабель в блок ППБ. В этом блоке осуществляются усиление, предварительная фильтрация и оцифровка данных.

Результаты аналого-цифрового преобразования передаются в дифференциальную линию связи в виде 32-разрядных информационных слов. В центральном блоке выполняются прием потока данных от 8 ППБ, привязка к синхронным меткам 800 Гц, цифровая фильтрация и децимация данных. Буферизованные данные блоками по 512 байт поступают в ПК. Программа сбора проводит сортировку информационного потока, дополнительную цифровую фильтрацию и децимацию данных, сравнение уровней сигналов с установленными порогами критериев. Данные записываются на жесткий диск ПК в виде файлов. ИСС-48 комплектуется программой регистрации и визуализации данных, устанавливаемыми на РС-совместимый компьютер. Программы разработаны для операционных систем Windows – XP/Vista. Параметры блока “Ангара7-8L” даны в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8. Характеристики центрального блока “Ангара7-8L”

Техническая характеристика	Параметр
Количество подключаемых линий связи	8 (Лин. 0 ÷ Лин. 7) для ППБ “Байкал-112”
Прочность гальванической развязки линии связи от других линий и от ПК, В	1000
Интерфейс с ПК	USB
Точность привязки к сигналам точного времени	Не хуже 0.001 с
Напряжение питания ЦБ, В	9.5÷16 постоянного тока
Потребляемая мощность, Вт	Менее 1
Габаритные размеры ЦБ, мм	260×190×90
Масса ЦБ, кг	1
Тип подключаемых ППБ	“Байкал-112”
Общее количество каналов регистрации	48 (6×8) для ППБ “Байкал-112”
Диапазон температур, °С:	
рабочий	0 ÷ + 60
хранения	- 40 ÷ + 70

**3.9. В ИГД СО РАН совместно с ИЛФ СО РАН и филиалом ИФП – КТИ ПМ СО РАН разработана система контроля сейсмодетформационных процессов в блочных массивах горных пород на рудниках на основе сейсмической станции с блоками типа “Байкал” для измерения сейсмических колебаний в массиве и тензометрического зонда для измерения поперечных деформаций в сечении скважины на основе оптико-поляризационных датчиков [35 – 39].**

Система, схема которой представлена на рис. 15, функционально состоит из двух измерительно-регистрирующих блоков: БИ-3 — сейсмическая станция с регистратором типа “Байкал-7HR” (см. п. 3.8); БИ-4 — трехканальная тензометрическая станция для измерения поперечных деформаций в сечении скважины на основе оптико-поляризационных датчиков (см. п. 3.7 и рис. 14). В состав тензометрической станции входит трехкоординатный скважинный измерительный зонд и электронный узел.

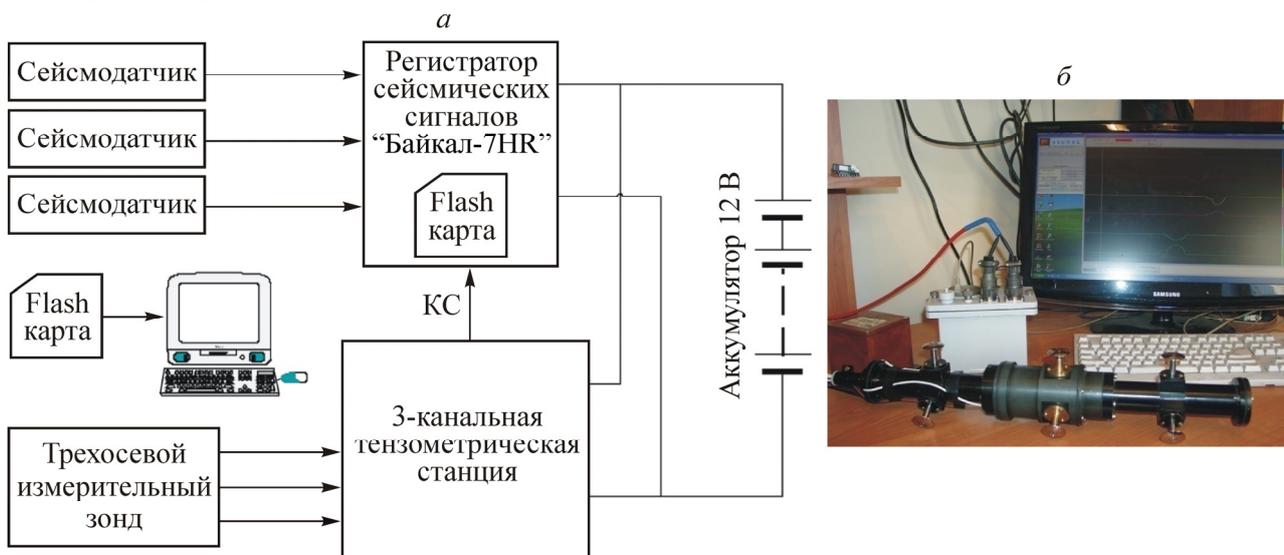


Рис. 15. Структурная схема измерительной системы мониторинга сейсмодетформационных процессов в массиве горных пород (а) и вид измерительного тензометрического зонда, регистратора “Байкал-7HR” и сейсмоприемника в сборе (б)

Аналоговые сигналы с тензометрической станции по каналу связи КС поступают на регистратор сейсмических сигналов “Байкал-7HR”, где синхронно с сигналами сейсмических датчиков записываются на Flash-карту. Абсолютное время записи определяется по внутренним часам регистратора, синхронизированным по часам GPS. По окончании записи Flash-карта переносится на компьютер, где производится обработка данных.

Систему планируется использовать на рудниках для контроля вертикальных деформаций бортов выработки по глубине при снижении горного давления по контуру обнажения с помощью разгрузочных скважин и образования вблизи контура краевых зон, находящихся под действием опорного давления (рис. 16). Стрелки указывают направление сжатия по контуру выработки, график отражает качественное изменение напряжений по глубине массива в бортовой части выработки. Штриховыми линиями обозначен характер снижения сжимающих напряжений по мере бурения скважин (см. рис. 13а). В скважине показана расстановка датчиков поперечных деформаций. Система снабжена аккумулятором и в данной версии может работать автономно.

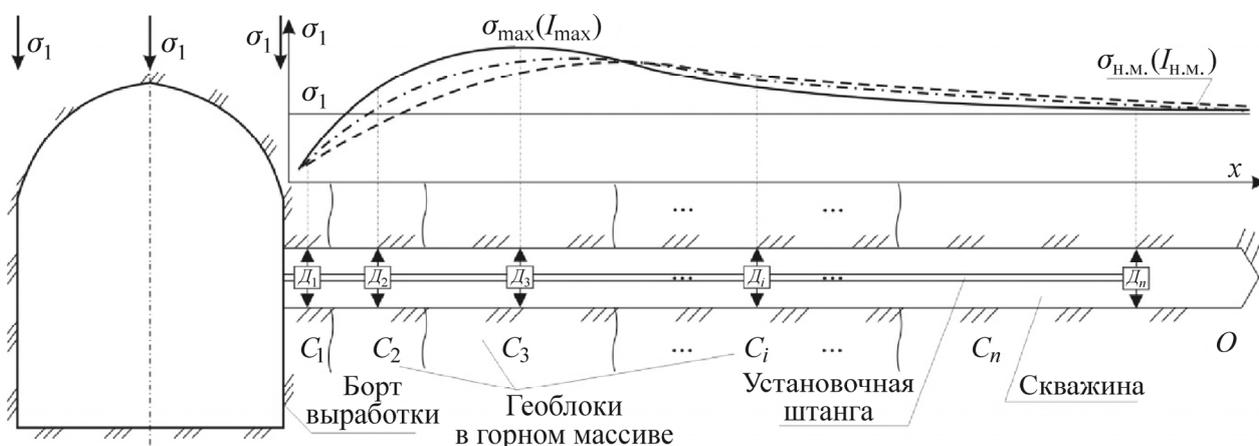


Рис. 16. Схема измерений вертикальных деформаций пород борта подземной горной выработки по глубине при снижении горного давления по контуру обнажения с помощью бурения разгрузочных скважин

**3.10. В ИГД СО РАН совместно с ИЛФ СО РАН и филиалом ИФП – КТИ ПМ СО РАН разрабатывается наблюдательная станции для сейсμοдеформационного и электромагнитно-эмиссионного мониторинга в подземных условиях рудника, в состав которой входят соответствующие измерительные приборные комплексы, линия связи с возможностью передачи данных в информационно-вычислительный центр на поверхности земли, а также оборудование по обеспечению как автономного, так и дистанционного электропитания.**

В состав представленного на рис. 17 варианта наблюдательной станции входит 4-канальный продольный деформометр, который планируется устанавливать по почве в нише подземной выработки в зоне геологических разломов и разрывных нарушений с подключением к аккумулятору и локальной линии связи длиной 200 м.

Реализация проекта наблюдательной станции позволит сформировать инфраструктуру контроля геодинамической безопасности рудника или шахты, определить комплектность поставки соответствующих контрольно-измерительных приборных комплексов для реализации сейсμοдеформационного и электромагнитно-эмиссионного мониторинга в подземных условиях, выбрать оборудование для электропитания таких систем, подключения линий связи для передачи

данных в информационно-вычислительный центр, осуществить защиту технических средств от внешних воздействий. Это предполагает привязку к конкретному руднику в части выбора схем измерений и подключения оборудования.

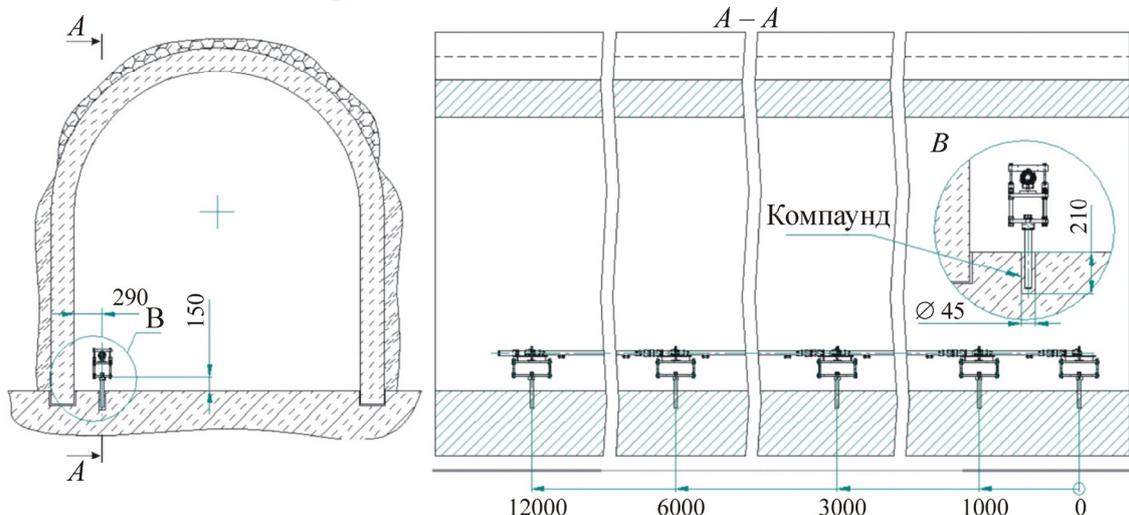


Рис. 17. Схема наблюдательной станции с вариантом монтажа 4-канального продольного деформометра для измерения смещений геоблоков в массиве с закреплением измерительных модулей по почве выработки в подземной нише рудника или шахты

### 3.11. В ИГД СО РАН совместно с ФГУП Сибирский НИИ метрологии разработан и изготовлен многофункциональный стенд для испытаний и метрологических проверок скважинных многоканальных продольных деформометров [32, 33].

Технические возможности модификаций стенда позволяют как моделировать медленные колебательные процессы в блочных средах, так и проводить метрологические испытания многоканальных продольных деформометров с помощью имитации смещений геоблоков вдоль скважины. Конструкция и внешний вид стенда показаны на рис. 18.

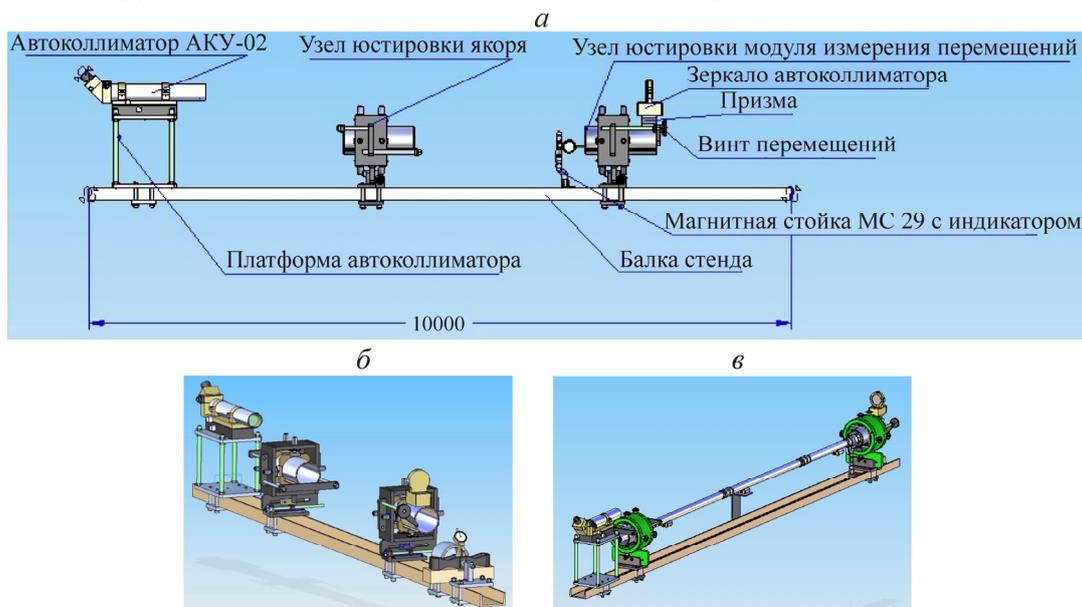


Рис. 18. Схема стенда для метрологической проверки продольных деформометров (а); укомплектованное оптической системой конструктивное устройство юстировочных узлов в аксонометрии (б) и монтаж измерительного зонда прибора на стенде для проверки (в)

В состав стенда входят: жесткое массивное основание, неподвижная цилиндрическая секция с координатным устройством (юстировочный узел), базовый модуль поверяемого прибора, подвижная цилиндрическая секция с координатным устройством, измерительный модуль деформометра [33], измерительные индикаторы линейных перемещений, приборный столик, лазерный тахеометр (на рисунке не показан), автоколлиматор АКУ-02.

**3.12. В ИГД СО РАН проведено обоснование метода сухого измерительного гидроразрыва и разработан скважинный зонд для определения напряжений в массиве горных пород [40, 41].**

Рассмотрены возможности использования в измерительном гидроразрыве вязкого флюида и переход на так называемый сухой гидроразрыв, что позволяет получить ряд новых существенных преимуществ в применении данного способа определения напряжений в породном массиве: осуществлять направленный гидроразрыв, который реализуется при помощи искусственно создаваемых концентраторов напряжений вдоль образующей либо в поперечном по отношению к оси измерительной скважины направлении; управлять процессом развития трещины гидроразрыва за счет регулирования скорости (либо объема) подачи рабочего тела (флюида); выполнять в одной скважине серию разнонаправленных гидроразрывов для определения компонентов действующих напряжений при неизменных физических свойствах породной среды.

Анализ вариантов исполнения скважинных зондов для осуществления сухого гидроразрыва позволил выделить три варианта реализации его конструкции (рис. 19а–в). Для исследования особенностей формирования трещины гидроразрыва при использовании флюидов различной вязкости, а также испытания отдельных элементов зонда создан лабораторный стенд (рис. 19г). Визуализация конфигурации трещины гидроразрыва достигается применением пенетрирующих растворов при испытаниях метода и зондов на образцах из органического стекла.

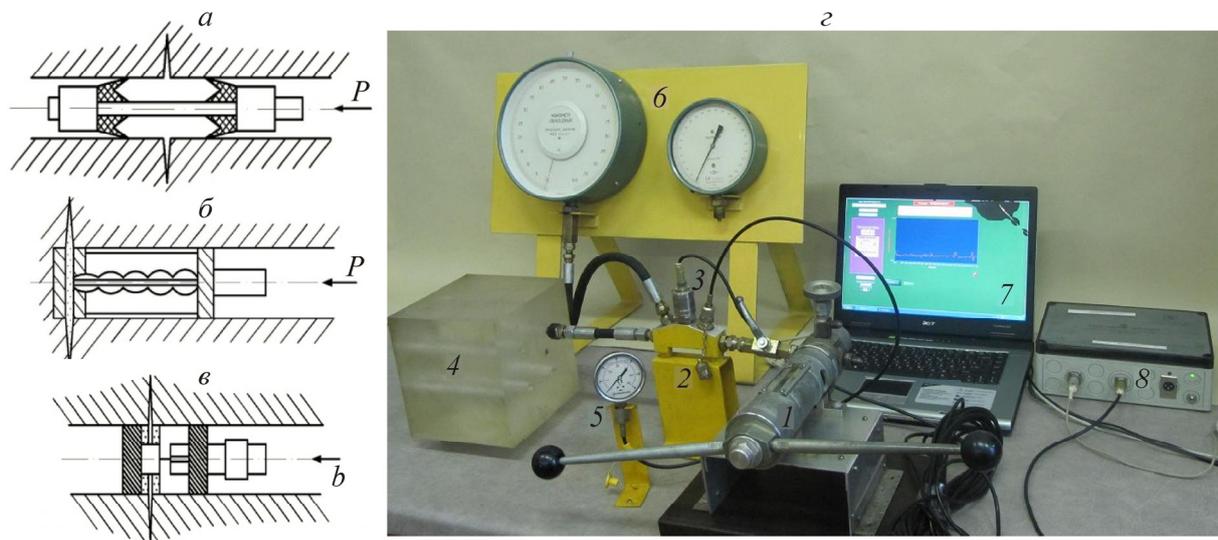


Рис. 19. Возможные схемы конструкции зонда для гидроразрыва с вязким флюидом: а — двухпакерный зонд; б — однопакерный зонд в забое скважины; в — зонд одноразового использования; г — лабораторный стенд для исследования особенностей формирования трещины при сухом гидроразрыве и испытаний конструкций зонда: 1 — пресс-расходомер; 2 — адаптер; 3 — датчик давления; 4 — образец из оргстекла; 5, 6 — манометры; 7 — портативный компьютер; 8 — регистратор давления

**3.13. В ИГД СО РАН разработан скважинный зонд с двумя пакерами для гидроразрыва горных пород вязким флюидом с использованием раздвижных колец оригинальной конструкции. Кольца при осевом перемещении изменяют наружный размер зонда и гер-**

метизируют узкий (щелевой) участок скважины (рис. 20а), подвергаемый нагружению в процессе гидроразрыва [40, 41].

На стенде изучаются особенности формирования трещин в образцах кубической формы со скважиной при различных вариантах их нагружения и режимах гидроразрыва стенок последней. Установлено, что в ненагруженных образцах развивается, как правило, односторонняя трещина по образующей скважины (рис. 20б). Трещина имеет произвольную ориентацию, а ее протяженность ограничена размером межпакерного расстояния.

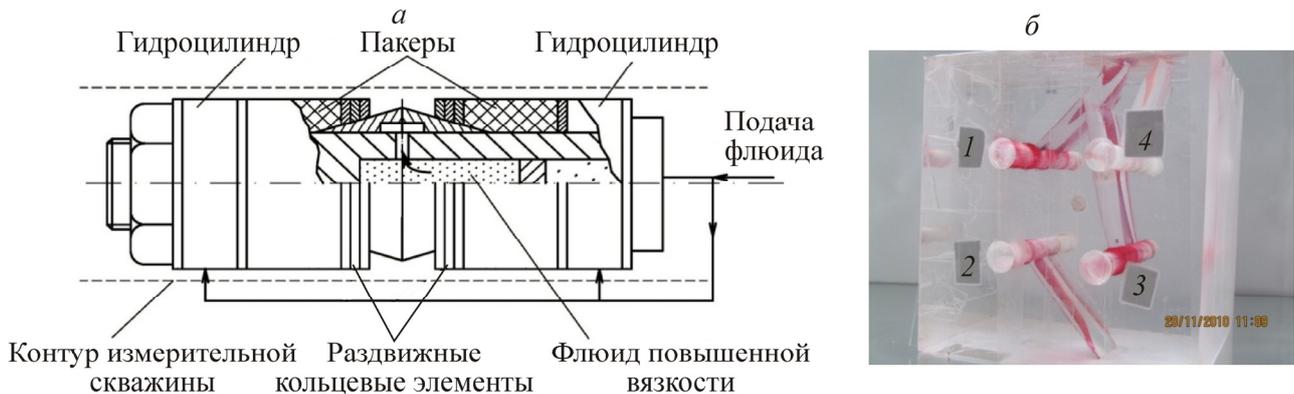


Рис. 20. Конструкция измерительного зонда (а) и вид образца из оргстекла с трещинами гидроразрыва стенок скважины (б)

Разработана конструкция многофункционального регистратора параметров давления в составе оборудования для измерительного гидроразрыва (рис. 21). Особенностью конструкции является использование беспроводного канала связи регистратора с компьютером, что обеспечивает комфортные условия при производстве шахтных экспериментов.

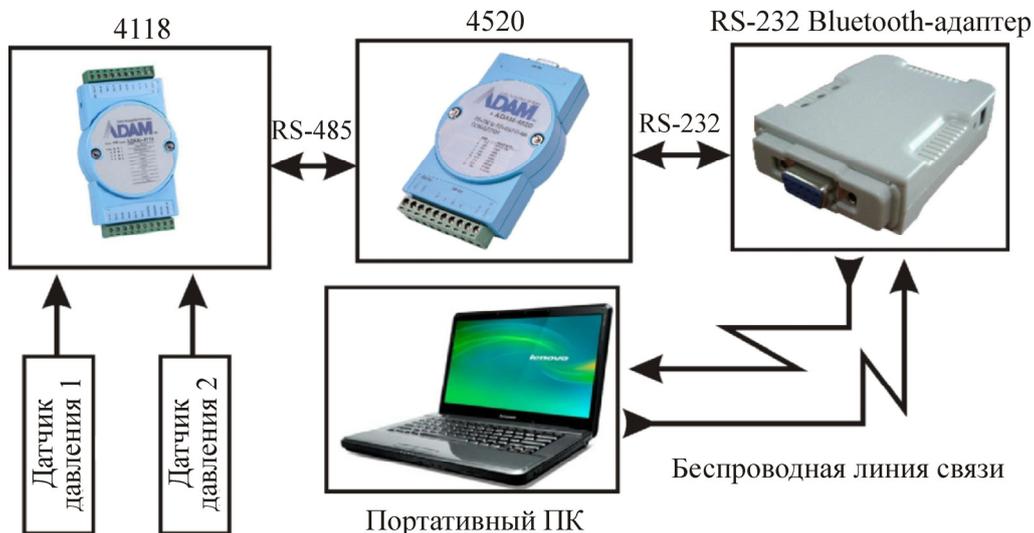


Рис. 21. Функциональная схема регистратора для измерительного гидроразрыва

Техническая характеристика регистратора: напряжение питания — 12 В; потребляемая мощность — 0.5 Вт; время непрерывной работы — 16 ч; число каналов — 2; диапазон измерений — от 0 до 60 МПа; погрешность измерений — не хуже 2 %; линейность — программируемая; период измерений — от 10 до 100 замеров/с; температурный диапазон — от 0 до 30°C; предельная дальность связи в открытом пространстве — не менее 100 м.

**3.14. В ИЗК СО РАН совместно с ИГД СО РАН разработан метод оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) массивов горных пород и измерительный гидравлический деформационный комплекс (ИГДК) в составе гидравлической системы управляемого воздействия на массив и системы контроля перемещений геоблоков “Сдвиг-ИГД” для его реализации [42, 43].**

Испытания показали эффективность применения комплекса для оценки уровня НДС в массивах пород открытых и подземных горных выработок. Особенность метода — применение гидравлической системы для управляемого динамического нагружения блочной геосреды. Процесс силового воздействия осуществляется с помощью устанавливаемых в массиве гидравлических домкратов ДН50П15, способных создавать усилие до 140 т. Такие домкраты разработаны в различных модификациях и пригодны для использования в местах с узким проемами, в том числе и в трещинах породных массивов (рис. 22).

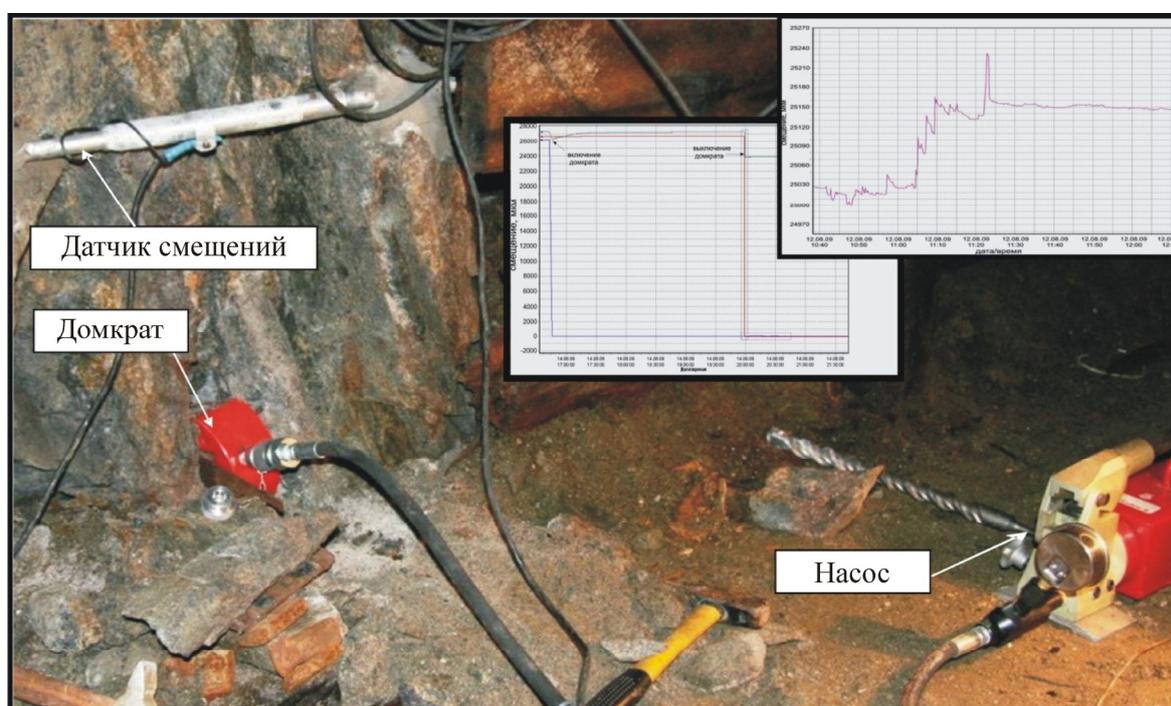


Рис. 22. Испытания комплекса ИГДК в штольне на полигоне “Талая” для оценки параметров НДС в породном массиве. Деформации измерялись с помощью системы “Сдвиг-ИГД”. Слева вверху в трещине установлен датчик смещений. На графиках показаны записи ступенчатого нагружения массива с помощью домкрата и сигнал деформационного отклика

Предлагаемый метод и оборудование для оценки НДС горных массивов обладают следующими преимуществами: простота технических устройств, возможность проводить измерения непосредственно в породном массиве и получать количественные данные о его напряженном состоянии, изучать отклики по деформированию и давлению на различные виды динамических воздействий (взрывы, закачка водных растворов, разгрузка при выемках и перемещении пород). Определяемые таким способом деформационные параметры блочной среды и межблочных промежутков дают возможность оценивать параметры нормальной и сдвиговой жесткости даек, жил, различного рода контактов, других неоднородностей. Как полагаем, развитие этого метода позволит подойти к оценке интегральных параметров горного массива или тектониче-

ского нарушения. При этом появляется возможность исследовать напряженное состояние с учетом блочного строения массива, выяснять его механические свойства, прогнозировать отклики на процессы горнопроходческой деятельности.

Комплекс ИГДК обеспечивает контролируемое нагружение отдельных элементов горного массива для достижения необходимых механических эффектов разгрузки или смещений в разных направлениях по отношению к нормальным или сдвиговым напряжениям в целях снижения риска проявления опасных динамических процессов. При этом возникает возможность проводить направленное легко контролируемое смещение берегов тектонических разрывов, т. е. ускорять или замедлять скорость смещений, а следовательно, изменять напряженное состояние породного массива в нужную сторону для предотвращения возможных негативных последствий от динамического разрушения важных объектов при проходке горных выработок. Возможности применения ИГДК могут быть рассмотрены и в технологиях эффективного управления деформациями и напряженным состоянием блочных массивов горных пород в горно-технологических аспектах.

**3.15. В ИНГГ СО РАН разработана структура подсистемы прецизионного управления источниками зондирующих сигналов при активном виброрейсмическом мониторинге горного массива, сопряженная с системой регистрации “ЛАВА” [14, 44 – 46].**

Разработана принципиальная электрическая схема прецизионного управления электропривода, ориентированного для работы как на механический пьезокерамический (ПК) излучатель, так и на токовую петлю электромагнитного (ЭМ) излучателя. Проведено программное моделирование работы схемы на индуктивно-емкостную L-R нагрузку в 0.003 Гн и 10 Ом (эквивалент ЭМ петли — в овале на рис. 23) с расчетной амплитудой тока  $\pm 20$  А и перепадом напряжения 200 В.

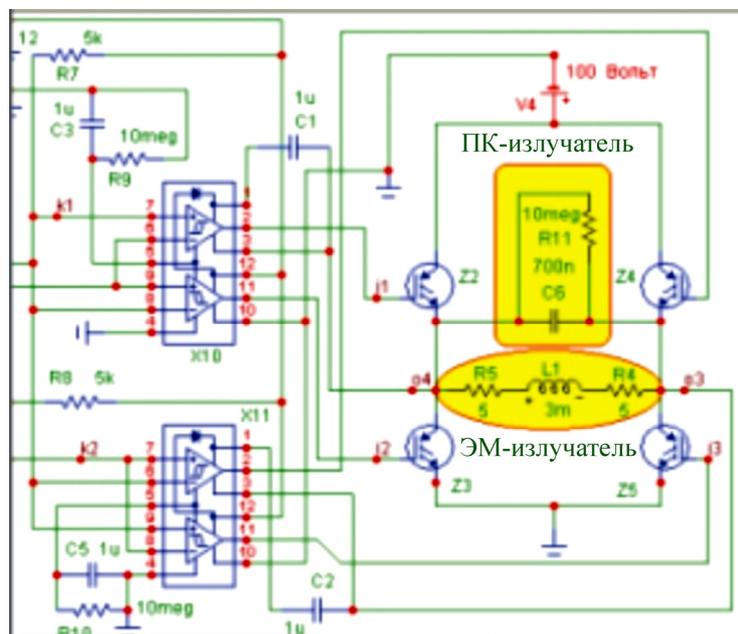


Рис. 23. Фрагмент принципиальной схемы “гибридного” электропривода

Предусмотрена возможность параллельного подключения пьезокерамического излучателя (эквивалент ПК — в прямоугольнике на рис. 21), т. е. создания “гибридного” вибро-сейсмо-электромагнитного источника зондирующих сигналов, управляемого программным генератором системы управления и регистрации “ЛАВА-РУ”. Оптимизация параметров эквивалентных схем обеспечивает допустимые перенапряжения коммутации на виртуальных силовых транзи-

сторях (на рис. 24 линия “b”). В настоящее время производится макетирование схемы на реальных силовых модулях (IGBT-транзисторы, 50 А, 1200 В) и соответствующих высоковольтных драйверах.

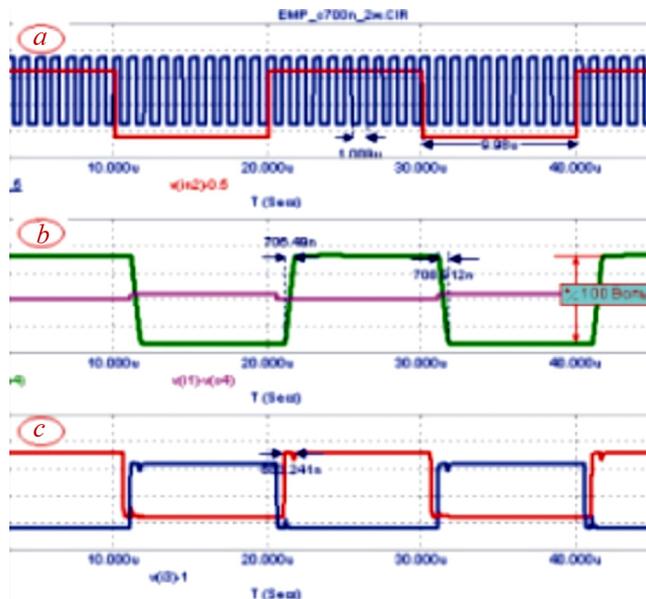
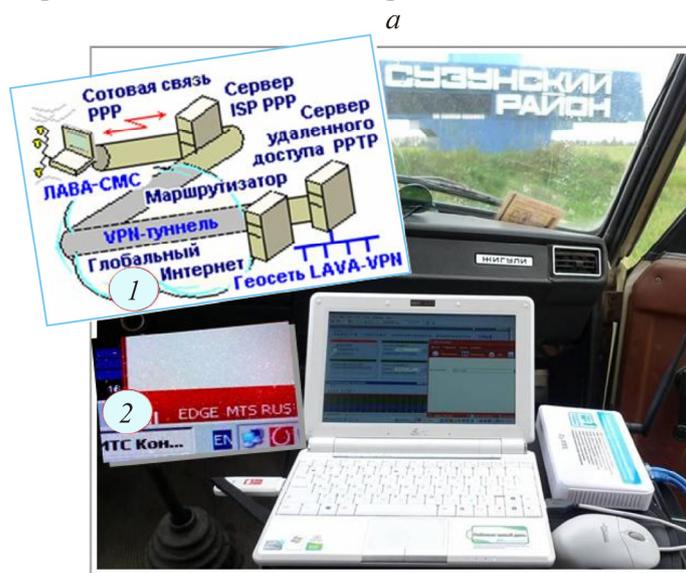


Рис. 24. Фрагмент моделирования работы схемы “гибридного” электропривода

Разработаны также программно-технические средства информационной подсистемы “ЛАВА-ГИС” для обеспечения функционирования сейсмоизмерительных систем в режимах активного вибросейсмического мониторинга.

Проведены полевые испытания четвертого компонента системы регистрации “ЛАВА” — геоинформационной подсистемы “ЛАВА-ГИС” с использованием сотовой связи. Возможности системы изучены при обеспечении передачи данных мобильной сейсмостанции “ЛАВА” на стационарный WWW-VPN-сервер в Новосибирске. Испытания осуществлены в полевых условиях Новосибирской обл. и Краснодарского края (рис. 25). Максимальная расчетная скорость обмена информацией в зонах покрытия сотовыми сетями третьего поколения составляет 3.6 Мб/с.



Начало рис. 25



Рис. 25. Сейсмостанция “ЛАВА-СМС” в режиме передачи сейсмической информации в реальном масштабе времени по VPN-сети Интернета (1) с использованием сотовой связи (а) и обработка VPN-соединений между мобильной сейсмостанцией “ЛАВА-СМС” и VPN-сервером LAVA.RU (б). Для каждой точки указаны тип соединения и скорость передачи канала сотовой связи. Скорость связи по технологии EDGE (2) — 236.8 кбит/с

**3.16. В ИЛФ СО РАН разработан автоматизированный лазерный деформографический комплекс для регистрации малых деформаций и собственных колебаний земной поверхности, поддерживаемых естественной слабой сейсмичностью земной коры в двух взаимно ортогональных интерферометрических плечах и одном коротком плече. Для контроля моментов вступления землетрясений в состав комплекса включена для синхронной работы сейсмическая станция “Байкал” [11, 47].**

Для долговременных наблюдений за ходом деформационных смещений скальных горных пород в земной коре разработана высокочувствительная гетеродинная лазерная система (рис. 26).

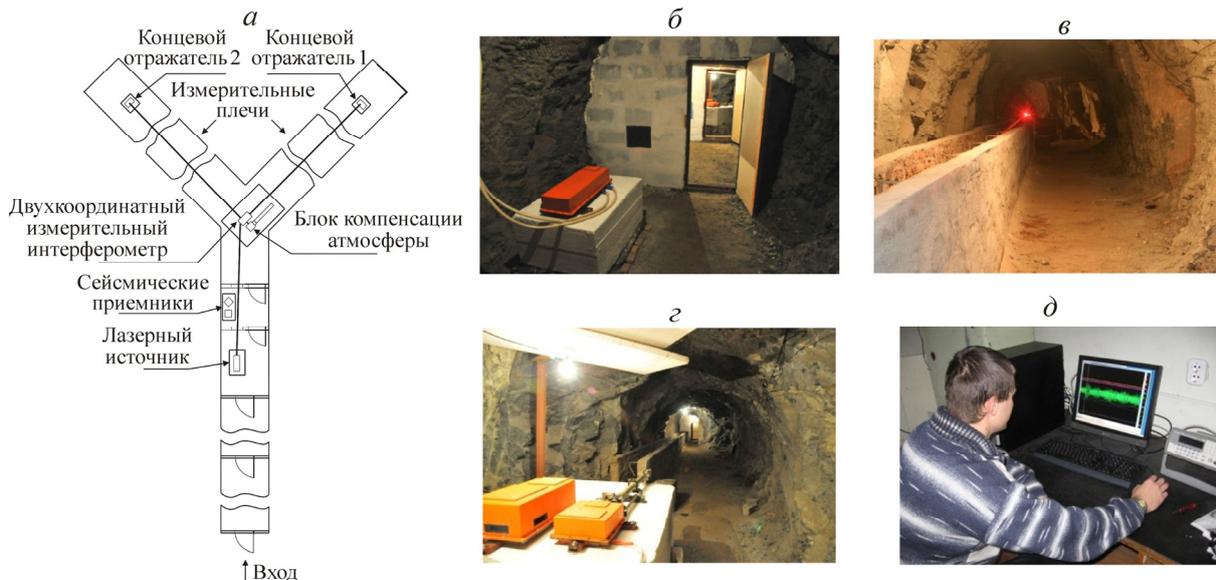


Рис. 26. Схема расположения двухканального лазерного деформографа в штольне (а); источник лазерного излучения (б); измерительное плечо (в); концевой отражатель деформографа (г) и рабочее место оператора по управлению комплексом и обработке сигналов измерений (д)

В основе системы лежит двухканальный оптический лазерный интерферометр-деформограф, построенный по равноплечной схеме, представленной на рис. 26а, с длиной измерительных плеч  $L = 22.5$  м, устанавливаемых в штольнях (рис. 26в). Источник лазерного излучения (рис. 26б) и регистрирующая часть He-Ne лазерного деформографа (рис. 26г) размещаются в производственном помещении, также находящемся в штольне. Дистанционное управление комплексом и запись регистрируемых вариаций оптической длины измерительного плеча осуществляется с помощью компьютера (рис. 26д). Оптико-механические блоки деформографа укреплены на бетонных постаментах, жестко связанных со скальным грунтом.

Регистрация фазовых сигналов деформографа осуществляется в области пространства, где локализованы бегущие интерференционные картины в первом и во втором плечах интерферометра. Оптические сигналы детектируют на разностных частотах с помощью соответствующих фотоэлектрических преобразователей. При смещении их с излучением гетеродинного лазера выделяются доплеровские приращения частоты (знак приращения зависит от направления движения концевых отражателей). Далее частотные сигналы поступают на вход согласующих усилителей. Усиленные сигналы после цифрового преобразования накаливаются в компьютере.

**3.17. В ИГД СО РАН создана и запущена в эксплуатацию не имеющая аналогов в России многоканальная измерительная система “Карьер” для контроля геомеханического состояния бортов глубоких карьеров алмазоносных трубок Якутии (рис. 27).**

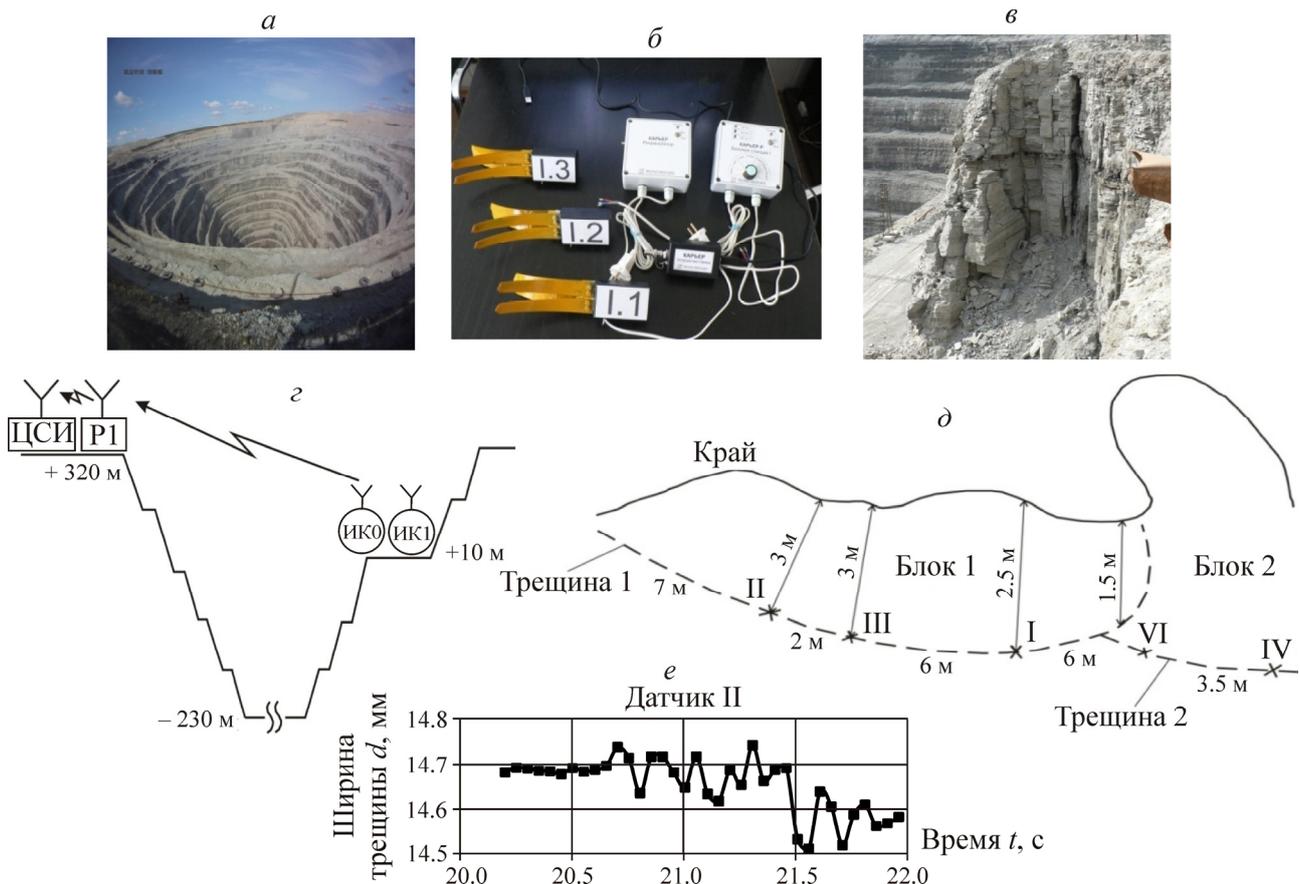


Рис. 27. Система мониторинга геомеханического состояния бортовых откосов “Карьер” на глубоком карьере “Удачный”: а — карьер; б — датчики деформаций; в — контролируемый уступ карьера; г — схема ретрансляционной передачи информации по радиоканалу; д — схема экспериментов измерения динамического воздействия от технологических взрывов на дне карьера; е — фрагмент динамической реакции блочной среды по одному из датчиков деформаций, находящемуся в контролируемой трещине

Входящий в состав системы “Карьер” измерительно-вычислительный комплекс со специально созданными деформационно-волновыми датчиками и радиоканалом дистанционной передачи информации в Центр сбора (ЦСИ) позволяет решать задачи по оценке устойчивости прибортовых зон глубоких карьеров в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Крайнего Севера. В настоящее время система в составе двух измерительно-вычислительных комплексов проходит опытную эксплуатацию в режиме мониторинга на трубке “Удачная” (Якутия) [48–50].

**3.18. Институтом динамики геосфер РАН совместно с ОКБ ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, фирмой “SASA” (Италия) и научно-производственным кооперативом “GEOS” разработана система контроля устойчивости горных склонов (рис. 28) на базе сейсмического мониторинга, включающая малоапертурную сеть пунктов регистрации и центр сбора, накопления и отработки информации [22, 51].**

Система осуществляет диагностику механического состояния блочно-иерархической среды на основе регистрации протекающих в ней релаксационных процессов и ранжирования локальных участков по механической устойчивости. Она успешно испытана в окрестности г. Грозио (Южные Альпы, Италия).

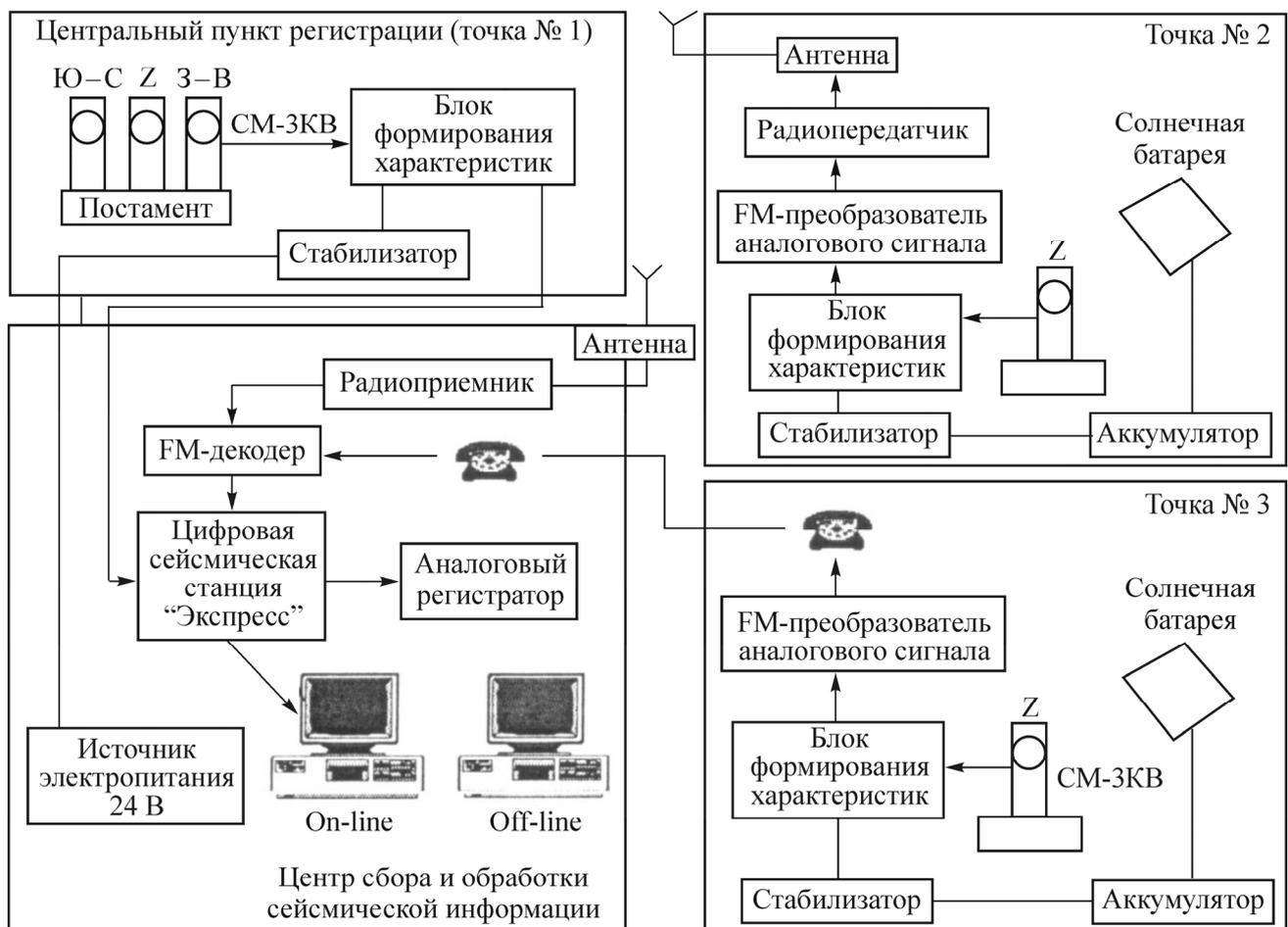


Рис. 28. Схема проведения микросейсмической регистрации в районе г. Грозио (Италия)

Пункты регистрации размещались в специально оборудованных бетонированных бункерах. Постаменты под сейсмоприемники в виде бетонных фундаментов, развязанных относительно бетонных стенок бункера, выполнялись на скальном основании массива горных пород.

Центральный пункт регистрации (рис. 29) оборудован трехкомпонентными сборками высокочастотных сейсмоприемников СМ-ЗКВ и длиннопериодных сейсморегистраторов ССМ.

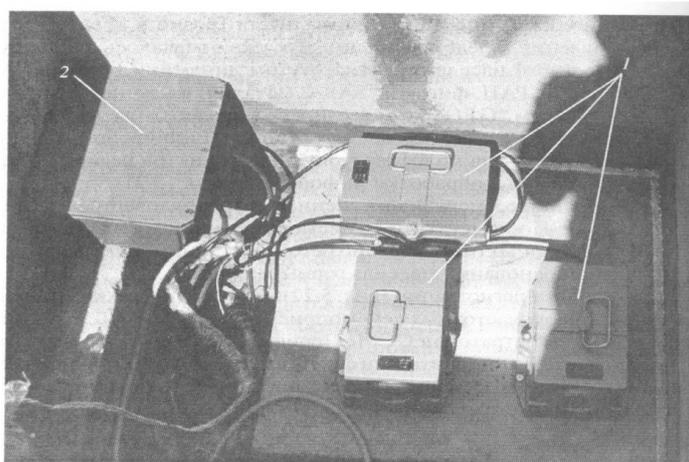


Рис. 29. Внутренний вид трехкомпонентного пункта микросейсмической регистрации в г. Грозио.  
1 — сейсмометры; 2 — блок формирования характеристик

Периферийные пункты регистрации оборудованы однокомпонентными сейсмоприемниками СМ-ЗКВ (вертикальная составляющая). Основные характеристики используемых средств регистрации приведены ниже.

#### Технические характеристики средств регистрации

##### *Сейсмоприемник СМ-ЗКВ*

Приведенная длина маятника	$8.4 \cdot 10^{-2}$ м
Период собственных колебаний маятника	2 с
Момент инерции маятника	$8.5 \cdot 10^{-3}$ кг·м <sup>2</sup>
Степень затухания, не более	0.02
Рабочий диапазон частот	0.5 – 100 Гц
Коэффициент преобразования	135 – 150 В·с/м
Рабочий диапазон температур	– 10 ÷ + 40°С

##### *Сейсморегистратор ССМ*

Частотный диапазон велосимметрического канала	0.005 – 20 Гц
Коэффициент преобразования	2000 В·с/м

##### *Система телеметрической передачи информации УБК-ПЭ*

Дальность передачи информации	5 км
Диапазон частот модуляции сигнала при передаче	300 – 3900 Гц
Число информационных каналов	3
Диапазон частот передаваемых сигналов	0.1 – 30 Гц
Динамический диапазон	60 Дб
Коэффициент взаимных корреляций между каналами на частоте 1 Гц	50 Дб

##### *Цифровой регистрирующий комплекс “Экспресс”*

Число каналов регистрации	12
Динамический диапазон	96 Дб
Количество разрядов АЦП	15
Суточная нестабильность системы службы времени	18 мс

Наличие трехкомпонентного и двух разнесенных в пространстве однокомпонентных пунктов регистрации обеспечивало возможность не только сравнительной регистрации микросейс-

мического фона, но и (при соответствующем программном обеспечении) установление эпицентров импульсных микросейсмических проявлений (данные трехкомпонентной регистрации позволяют определять азимут подхода и угол выхода сейсмического сигнала).

Структура системы регистрации предусматривала (см. рис. 28) использование трех типов связи между пунктами регистрации и центром сбора, накопления и обработки информации: кабельная линия связи с пунктом 1, радиоканал с пунктом 2 и телефонный канал с пунктом 3.

Электропитание оборудования, размещенного на пунктах сейсмической регистрации, осуществлялось подачей напряжения из центра сбора информации (пункт 1) либо с использованием солнечных батарей (CSB 013 фирмы CHRONAR, рис. 30) совместно с буферными аккумуляторами (24 Вт, 12 В) на пунктах 2 и 3.



Рис. 30. Внешний вид пункта 2 микросейсмической регистрации в г. Грозио (на заднем плане видны солнечная батарея и передающая антенна)

В качестве радиопередатчика (пункт 2) использовался мало потребляющий 1000-канальный приемопередатчик AR-280 (AR, Япония), в качестве радиоприемника (центр сбора информации) — 4-канальный приемопередающий комплекс “Sintex-160” (“Lables”, Италия).

Используемый на пунктах 2 и 3 блок телеметрии УБК ПЭ (ОКБ ИФЗ РАН) обеспечивал устойчивую передачу информации в центр сбора и обработки в течение всего периода эксплуатации сейсмической сети (февраль – май 1991 г.).

Регистрация первичной информации проводилась с помощью цифрового сейсмического регистратора “Экспресс”. Накопление информации шло на винчестер РС, работающий в режиме “on-line”.

Инструментальные наблюдения за уровнем микросейсмического фона проводились практически непрерывно в течение февраля – мая 1991 г. В результате обработки и анализа полу-

ченных данных определены основные амплитудные и спектральные характеристики микросейсмического фона, а также импульсных микросейсмических колебаний (ИК); структура микросейсмического фона и ее вариации в течение суток и за время проведения измерений.

Суточные амплитудные вариации микросейсмического фона (энергетический вклад отдельных составляющих) представлены на рис. 31. Усреднение регистрируемых параметров проводилось по двухчасовым временным промежуткам (во временных окнах шириной 5–10 с) за все время проведения измерений.

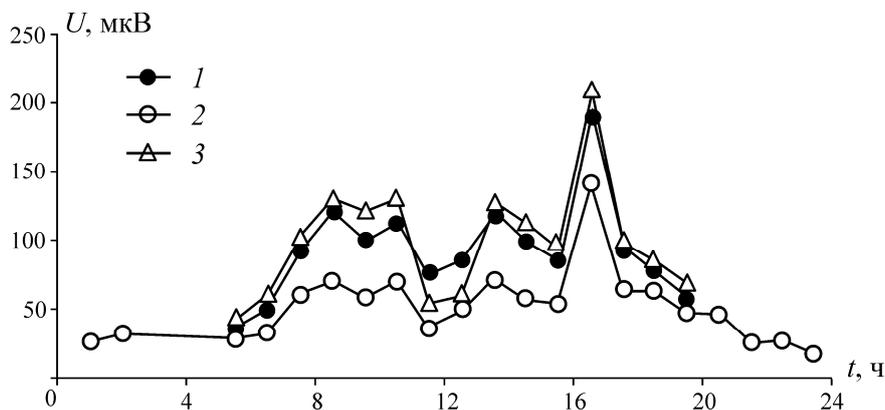


Рис. 31. Суточные вариации среднего модуля амплитуды фоновых микроколебаний в г. Грозно. Компоненты: 1 — север–юг; 2 — восток–запад; 3 — вертикальная

Естественное увеличение уровня микросейсмического фона в дневное время (с 7 до 17 ч) обусловлено наличием отклика среды на индустриальный шум, а также интенсификацией естественных процессов, в частности в результате прогрева верхнего слоя грунта (процессы переноса газов в проницаемом пространстве приповерхностного слоя и, как следствие, изменение характеристик релаксационных процессов).

Установлено ярко выраженное увеличение вклада более высоких частот в энергетический спектр в дневное время, что свидетельствует об интенсификации релаксационных процессов в среде в результате как прогрева приповерхностного слоя, так и возмущения структуры среды микроколебаниями техногенного происхождения [22].

**3.19. В Институте динамики геосфер РАН разработаны и созданы трехканальный регистратор ССД-3 и на его основе совместно с сейсмоприемниками СМ-3Е — автономная цифровая сейсмическая станция (АЦСС) [52, 53].**

Станция комплектуется одним вертикальным и двумя горизонтальными датчиками. Основные технические характеристики АЦСС представлены в табл. 9. Блок-схема регистратора ССД-3 и его фотография показаны на рис. 32.

Широкая полоса частот сейсмических колебаний, измеряемых станцией, позволяет существенно расширить комплекс проводимых ею исследований. Так, становятся возможными исследования структуры коры и верхней мантии методами Н/У-отношений, приемных функций и т. п.

Станция может работать как в автономном режиме с записью данных в микросхемы флэш-памяти, так и с передачей данных по кабелю в реальном масштабе времени. Настройка режимов работы производится с компьютера по любому из имеющихся в станции интерфейсов. Все настройки сохраняются во внутренней памяти станции, поэтому при установке АЦСС на объекте достаточно только включить питание. Это делает ее простой и удобной в эксплуатации, позволяет сократить время размещения аппаратуры.

В АЦСС предусмотрена возможность импульсной калибровки каждого из измерительных каналов. Калибровка инициируется по команде с компьютера нажатием кнопки на корпусе станции или в программно заданное время.

ТАБЛИЦА 9. Основные технические характеристики АЦСС

Параметр	Значение
Режим преобразования	Велосиметр
Количество каналов	3 синхронных (вертикальный и 2 горизонтальных)
Рабочий диапазон частот по уровню 0.7, Гц	0.01 – 30
Коэффициент преобразования по скорости, В·с/м	2000 ± 5 %
Динамический диапазон, не менее, дБ	125
Цена младшего разряда АЦП, мкВ	1.192
Разрядность АЦП	24
Частота оцифровки, Гц	10 – 1000
Потребляемая мощность (без передачи данных), Вт	1
Потребляемая мощность (с передачей данных), Вт	1.5
Уровень шумов, СКЗ, разряды	3 (на 100 Гц)
Калибровка	Импульсная поканальная по команде
Точность PPS меток GPS, мкс	± 10
Интерфейсы	USB, Ethernet, RS-232, RS-485
Режимы сбора данных	Непрерывный
Емкость флэш-памяти, Гбайт	3 (1 мес на 100 Гц )
Рабочий диапазон температур (регистрирующая часть), °С	От – 40 до + 60
Масса регистратора, кг	1.8
Габариты регистратора, мм	220×150×80

Важная особенность разработанной станции — одновременная выборка аналогового сигнала по всем трем каналам, что необходимо для точного восстановления поляризации сейсмического сигнала. Более того, если несколько таких станций являются элементами сейсмической группы, то синхронизация выборок АЦП всех станций обеспечивается с точностью до единиц микросекунд за счет использования запатентованных алгоритмов программных средств синхронизации [53].

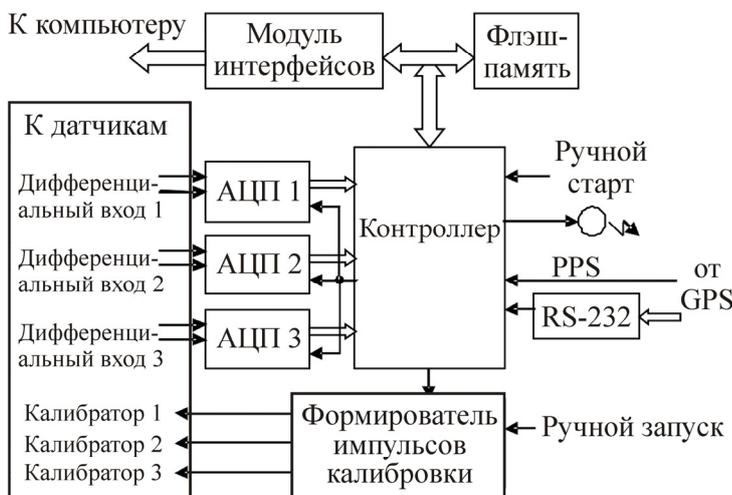


Рис. 32. Блок-схема регистратора ССД-3 и его внешний вид

С мая 2010 г. АЦСС включена в состав малоапертурной сейсмической антенны (МСА) “Михнево” как широкополосная трехкомпонентная точка наблюдения и работает в ней по настоящее время. В составе МСА “Михнево” данные с АЦСС передаются в центр сбора в режиме реального времени с помощью интерфейса Ethernet по оптоволоконному кабелю. Одновременно для исключения потери данных из-за сбоев в работе компьютерной сети ведется запись сейсмических сигналов во внутреннюю флэш-память станции. Исходя из частотной характеристики датчиков СМ-3Е, частота оцифровки составляет 100 Гц. При такой частоте хранящиеся во внутренней памяти станции данные за последний месяц работы в случае необходимости могут быть считаны через USB-интерфейс.

За четыре месяца работы с мая по август 2010 г. в составе МСА станцией зарегистрировано более сотни сейсмических событий (землетрясений и карьерных взрывов), например слабое землетрясение магнитудой 2.0 в районе г. Бердянска 14 мая 2010 г. в 23 ч. 19 мин. Отфильтрованные в полосе 0.5 – 10 Гц сейсмограммы этого события, полученные с помощью АЦСС, показаны на рис. 33.

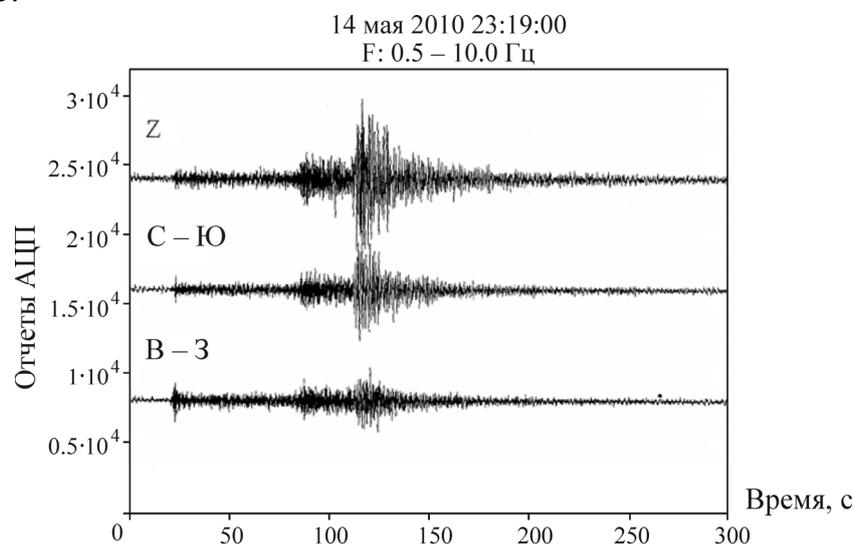


Рис. 33. Сейсмограммы события в районе г. Бердянска

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работах [12–16, 19–22] достаточно полно отражены результаты исследований и технических разработок в области методолого-методического обеспечения и научного приборостроения для нелинейной геомеханики и геофизики ряда ведущих научно-исследовательских и конструкторско-технологических институтов РАН и ее региональных отделений.

Основное внимание уделено развитию и внедрению в практику горного дела двух групп приборных комплексов: геомеханических, основанных на использовании закона Гука, для определения механических параметров геосреды, а также реологических проявлений горных пород и их массивов; горно-геофизических (или “косвенных”), основанных на использовании феноменологических зависимостей между напряженно-деформированным состоянием горных пород и контрольными геофизическими полями (сейсмическими, деформационными, электромагнитными и др.).

Из группы геомеханических наибольшее развитие и применение получили деформационно-волновые приборные комплексы скважинного типа, а также комплексы, основанные на механических принципах гидроразрыва пластов и породных массивов и их упругого “восстанов-

ления” в процессе разгрузки. Последние можно отнести к квазистатическим, малооперативным и часто “разового использования”.

Из группы горно-геофизических наибольшее развитие и применение в геомеханических системах мониторинга получили сейсмические и электрометрические приборы. Шахтными сейсмологическими станциями с наземными и подземными павильонами ныне успешно оснащаются горнодобывающие предприятия.

**Наметилась четкая тенденция по сближению и активному взаимодействию специалистов, разрабатывающих измерительные системы мониторинга и приборные комплексы горно-геофизического и геомеханического направлений. Основными факторами, способствующими такому сближению, стали новые открытия в области нелинейной геомеханики и геофизики, связанные с блочно-иерархическим строением массивов горных пород и геоматериалов, выделением групп медленных волн деформаций (волны маятникового типа), динамико-кинематические характеристики которых несут непосредственно информацию о напряженно-деформированном состоянии породных массивов и энергетических параметрах источников их излучения.**

**Реализованный объем научных исследований и технических разработок, несомненно, является крупным вкладом в развитие экспериментально-теоретических основ нелинейной геомеханики и геофизики, создавая соответствующие предпосылки для построения новых (прежде всего сейсмодеформационно-электромагнитных) систем комплексного мониторинга горных ударов и техногенных землетрясений на рудниках и шахтах России. Обеспечение их геоинформационной сопряженности и совместимости с ныне действующей Федеральной системой сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений России — залог успешного решения сформулированной авторами проблемы необходимости создания многослойной мониторинговой системы “Геомеханико-геодинамической безопасности России”. В этом нами видится и мощный конструктивный потенциал для укрепления научно-практического взаимодействия между геофизиками, геомеханиками и горняками при обеспечении стратегии освоения месторождений полезных ископаемых в ныне усиливающейся тенденции перехода на глубокие горизонты [17].**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
2. Патент РФ № 2097558. Способ контроля напряженно-деформированного состояния в блочных структурах геосферы, базовая опора, деформометр и регистратор / В. Н. Опарин, М. В. Курленя, А. А. Акинин и др. // Оpubл. в БИ. — 1997. — № 33.
3. Курленя М. В., Опарин В. Н., Акинин А. А. и др. Многоканальный оптоэлектронный деформометр продольного типа // ФТПРПИ. — 1997. — № 3.
4. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Акинин А. А. и др. Экспериментальные испытания многоканального оптоэлектронного продольного деформометра // ФТПРПИ. — 2000. — № 6.
5. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $v_u$  // ДАН. — 1993. — Т. 333. — № 4.
6. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. I: Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // ФТПРПИ. — 1996. — № 3.
7. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. II: Методика экспериментов и основные результаты физического моделирования // ФТПРПИ. — 1996. — № 4.

8. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. и др. Волны маятникового типа. Ч. III: Данные натурных измерений // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
9. Опарин В. Н., Симонов Б. Ф., Юшкин В. Ф., Востриков В. И., Погарский Ю. В., Назаров Л. А. Геомеханические и технические основы увеличения нефтеотдачи пластов в виброволновых технологиях. — Новосибирск: Наука, 2010.
10. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об одном подходе к прогнозированию горных ударов // ФТПРПИ. — 1998. — № 6.
11. Багаев С. Н., Опарин В. Н., Орлов В. А., Панов С. В., Парушкин М. Д. О волнах маятникового типа и методе их выделения от крупных землетрясений по записям лазерного деформографа // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
12. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007.
13. Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др. Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
14. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 1. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009.
15. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов. Т. 2. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010.
16. Опарин В. Н. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
17. Опарин В. Н. Геотехнологии будущего — геотехнологии “реакторного типа”: современные тенденции, научный задел, ключевые проблемы / Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: в 2 т. — Т. 1. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
18. Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений // Информационно-аналитический бюллетень. Спец. выпуск. — М.: МЧС России, 1995. — № 1.
19. Адушкин В. В., Спивак А. А. Геомеханика крупномасштабных взрывов. — М.: Недра, 1993.
20. Адушкин В. В., Спивак А. А. Подземные взрывы. — М.: Наука, 2007.
21. Адушкин В. В., Турунтаев С. Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). — М.: ИНЭК, 2005.
22. Кочарян Г. Г., Спивак А. А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. — М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003.
23. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: тез. докл. Всерос. конф.: в 2 т. / под ред. А. О. Глико и Ю. Г. Леонова. — М.: ИФЗ РАН, 2012.
24. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф. Измерительно-вычислительные комплексы для мониторинга напряженно-деформированного состояния породных массивов в областях с сильными техногенными воздействиями / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. конф. с участием иностр. ученых, 03–06 октября 2011 г., Новосибирск. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2011.
25. Опарин В. Н., Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Яковицкая Г. Е. и др. Модернизированная система АСИ-2 для контроля электромагнитной эмиссии образцов горных пород при их одноосном нагружении // ФТПРПИ. — 2010. — № 4.
26. Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е. Контроль разрушения конструкционных материалов по параметрам электромагнитного излучения / Тр. Междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, сент. 2009 г. — Томск: ИФПМ СО РАН, 2009.

27. Бритков Н. А., Кулаков Г. И., Шиповалов В. А. Электромагнитное излучение в скважинах на шахте “Таштагольская” / Тр. конф. с участием иностр. ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. — Т. 1.
28. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Автоматизированный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин / Тр. науч.-техн. конф. “Горнотехническое обеспечение безопасности ядерных технологий в подземных сооружениях”. — Железногорск, 2009.
29. Барышников В. Д., Качальский В. Г. Автоматизированный измерительный комплекс приборов для определения напряжений в массиве горных пород методом параллельных скважин // ФТПРПИ. — 2010. — № 3.
30. Гахова Л. Н. Температурные напряжения в массивах блочной структуры / Тр. конф. с участием иностр. ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы” — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. — Т. 1.
31. Барышников В. Д., Гахова Л. Н. Оценка и учет температурных погрешностей при определении напряжений в методе параллельных скважин // ГИАБ. — 2010. — № 6.
32. Юшкин В. Ф., Кулаков Г. И., Соколов Е. В., Плотников С. В. и др. Измерительная система мониторинга деформационно-электромагнитных процессов в массивах горных пород / Тр. конф. с участием иностр. ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. — Т. 1.
33. Опарин В. Н., Юшкин В. Ф., Поташников А. К. и др. Устройства непрерывного контроля параметров деформационно-волновых процессов в массиве горных пород. Ч. I: Принцип измерений продольных перемещений горных пород в скважине и конструкция позиционно-чувствительного датчика // ФТПРПИ. — 2005. — № 3.
34. Потапов В. П., Чугуй Ю. В., Поташников А. К., Сысоев Е. В. и др. К созданию станций глубинных реперов на основе оптоэлектронных датчиков для контроля смещений пород кровли подземной горной выработки / Тр. конф. с участием иностр. ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. — Т. 1.
35. Юшкин В. Ф., Изотов А. С., Федоринин В. Н., Сидоров В. И. и др. Тензометрическая станция измерительных зондов на основе оптико-поляризационных датчиков для определения поперечных деформаций скважины / Тр. конф. с участием иностр. ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосферы”. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. — Т. 1.
36. Опарин В. Н., Федоринин В. Н., Жигалкин В. М., Юшкин В. Ф. и др. Устройства непрерывного контроля параметров деформационно-волновых процессов в массиве горных пород. Ч. III: Зонд для определения поперечных деформаций скважины и его конструктивное устройство // ФТПРПИ. — 2005. — № 5.
37. Патент № 2157513 РФ. Эллипсометрический датчик / В. Н. Федоринин // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 28.
38. Федоринин В. Н., Сидоров В. И. Поляризационные оптические датчики для измерений физических величин // Журн. аналит. химии. — 2005. — Т. 55. — № 7.
39. Семибаламут В. М., Рыбушкин А. Ю., Юшкин В. Ф. и др. О системе контроля поперечных деформаций скважин и сейсмических процессов в подземных горных выработках рудников // ФТПРПИ. — 2011. — № 1.
40. Леонтьев А. В., Лобанова Т. В. О структурной перестройке породного массива, подверженного воздействию массовых и технологических взрывов / Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: материалы Всерос. совещ. — Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. — Т. 2.

41. **Леонтьев А. В.** Основные направления исследований при организации геомеханического мониторинга природно-технических систем / Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: сб. материалов V Междунар. науч. конгр. "Гео-Сибирь – 2009". — Новосибирск: СГГА, 2009. — Т. 2.
42. **Востриков В. И., Ружич В. В., Федеряев О. В.** Система мониторинга обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров // ФТПРПИ. — 2009. — № 6.
43. **Ружич В. В., Черных Е. Н.** К вопросу о технологии управления деформациями в разломах при механических воздействиях / Триггерные эффекты в геосистемах: тез. докл. семинара-совещания. — М.: ИДГ РАН, 2010.
44. <http://lava.nsc.ru/>
45. **Юшин В. И., Велинский В. В., Геза Н. И., Саввиных В. С.** Экспериментальная оценка тензочувствительности коры в районе Байкала по данным активного вибросейсмического мониторинга и упругого прилива // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 3.
46. **Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С.** Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 3.
47. **Багаев С. Н., Орлов В. А., Фомин Ю. Н., Чеботаев В. П.** Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли. — 1992. — № 1.
48. **Oparin V. N., Vostrikov V. I.** Multichannel Instrumentation System for Strain and Displacement Measurements, Proc. of the 2009 International Symposium on Mechatronic and Biomedical Engineering Applications, Cheng Shin University, Kaohsiung, Taiwan, 2009.
49. **Опарин В. Н., Востриков В. И., Юшкин В. Ф.** Инструментальные методы контроля устойчивости бортов карьеров в экстремальных природно-климатических условиях Севера / Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: тр. Всерос. науч.-практ. конф., посвященной памяти чл.-кор. РАН М. Д. Новопашина (г. Якутск, 13–15 сент. 2011 г.). — Якутск: Ин-т мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011.
50. **Востриков В. И., Федеряев О. В.** Исследование устойчивости обвалоопасных участков бортов глубоких карьеров / Нелинейные геомеханико-геодинамические процессы при отработке месторождений полезных ископаемых на больших глубинах: тр. 2-й рос.-кит. науч. конф., 2–5 июля 2012, г. Новосибирск. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
51. **Bashilov I., Spivak A.** Technical proposals, preliminary project. M., Grosio: Intern. Geophys. Centre, 1991.
52. **Башилов И. П., Волосов С. Г., Зубко Ю. Н., Королёв С. А., Николаев А. В.** Портативные цифровые сейсмические станции в системах сейсмического мониторинга // Вест. НЯЦ РК. — 2012. — Вып. 1 (49).
53. **Патент № 2434249 РФ.** Автономный цифровой сейсмометр / С. А. Королёв // Оpubл. в БИ. — 2011. — № 32.

*Поступила в редакцию 27/II 2013*