

УДК 550.34

© И. П. БАШИЛОВ

АППАРАТУРА ДЛЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ, МОНИТОРИНГА ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ И СРЕДЫ ОБИТАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

Предотвращение и предупреждение катастроф и опасных ситуаций базируется на технических возможностях, обеспечивающих мониторинг большого набора параметров, требующих контроля. Для этого могут быть использованы достижения геофизической науки и геофизического приборостроения. Метод геофизического мониторинга позволяет решить многие задачи по контролю и изучению как краткосрочных, так и долгосрочных временных вариаций геофизических параметров, что важно для обеспечения безопасности таких сложных технических сооружений, как гидроэлектростанции, дамбы, транспортные и другие наземные и подземные коммуникации и многое другое.

Современный уровень промышленного производства и строительства с резким увеличением используемых мощностей, разработка новых технологических процессов с жестко регламентированными правилами производства, жизнедеятельность крупных городов с высокой концентрацией населения, промышленности и транспорта, функционирование крупнейших транспортных магистралей требует надежных способов и технических средств, обеспечивающих контроль их состояния.

Проблема безопасности сложных технических сооружений и объектов может быть рассмотрена как их устойчивость по отношению к естественным природным катастрофам, таким как землетрясения, сдвиги, обвалы, наводнения и т.д. Однако разрушающие естественные процессы являются первой, наиболее очевидной частью проблемы безопасности. С другой стороны, сложные объекты сами могут стать источниками техногенных воздействий на геологическую среду и элементы своей конструкции.

В ряде случаев для предупреждения и предотвращения опасных ситуаций требуются нетрадиционные методы и технические средства, обеспечивающие контроль за состоянием как самих объектов, так и окружающей среды. Некоторые способы и системы такого контроля могут быть реализованы с использованием достижений геофизической науки и геофизического приборостроения. За последние два десятилетия был разработан метод геофизического мониторинга, который предусматривает наблюдения временных вариаций геофизических параметров, в том числе долговременные.

Этот метод успешно применяется при решении многочисленных задач в самых разнообразных

областях технической и научной деятельности включая:

- изучение геодинамических процессов и прогноз землетрясений;

- контроль безопасности крупных технических сооружений, а именно атомных и гидроэлектростанций, плотин, дамб и т. д.;

- контроль безопасности природных и искусственных геологических структур и процессов, таких как оползни, подземные захоронения радиоактивных и токсичных отходов и нефтехранилища;

- безопасная разработка и эксплуатация месторождений полезных ископаемых;

- контроль безопасности транспортных магистралей и подземных коммуникаций, а именно железнодорожных и трамвайных путей, особенно высокоскоростных, метрополитена, автомобильных трасс, трубопроводов, туннелей, мостов, подземных переходов и т.д.;

- выявление и контроль в больших городах и промышленных центрах техногенных источников повышенной вибрации (промышленные предприятия, транспортные потоки и т.д.);

- контроль микровибраций и подвижек уникальных и исторических сооружений, оснований прецизионного оборудования и т.д.

Перечень может быть продолжен. Для обеспечения безопасности геофизический контроль, как правило, необходимо осуществлять в процессе всего цикла эксплуатации, начиная с выбора мест при строительстве сооружений.

Известно, что земная кора находится в постоянном колебательном движении с очень малыми перемещениями. При этом, согласно современным представлениям, она имеет сложное строение и

состоит из отдельных блоков, разделенных ослабленными участками — зонами. В результате постоянного воздействия блоки совершают относительные перемещения, которые наиболее сильны на ослабленных участках. Если какое-либо сооружение расположено на таких участках, то оно постепенно теряет целостность по линии этой зоны: образуется скрытая система микротрещин, а затем и видимых трещин и разрывов фундаментов.

Своевременное выделение ослабленных тектонических зон является важнейшим элементом в проблеме контроля безопасности как уже построенных сооружений, так при выборе мест строительства промышленных и гражданских объектов.

В настоящее время разработаны методика и необходимые аппаратные средства для выявления активных, потенциально опасных зон в земной коре и на инженерно-строительных объектах. Это представляет особенный интерес для протяженных транспортных магистралей, наверняка проходящих через ослабленные участки.

1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Сложные технические сооружения и объекты могут оказывать на геологическую среду существенное воздействие, которое проявляется в изменении ее геомеханических характеристик и физических параметров, что в свою очередь приводит к вариациям геофизических полей. Отсюда следует, что наблюдения и контроль за вариациями геофизических полей, возникающих в результате техногенного вмешательства, позволят оценить происходящие процессы и, возможно, предсказать их последствия.

Существует также задача контроля воздействий, которые оказывают природные геофизические процессы. К ним относятся тектонические землетрясения, современные вертикальные и горизонтальные движения и деформации среды и др.

Кроме того, многообразная производственная деятельность часто имеет своим следствием различного типа механические подвижки как самого объекта, так и расположенных рядом сооружений. К ним относятся вибрации, наклоны и деформации, включая просадки, трещины, вертикальные смещения и т.д.

Основными задачами геофизического контроля вне зависимости от типа контролируемого объекта являются:

— диагностика с выдачей предупреждения о возможных природных или техногенных процессах с негативными последствиями для объекта;

— контроль за собственными микроподвижками объекта и его воздействием на окружающую среду.

Существующий опыт показывает, что наиболее эффективным является комплексирование разных геофизических методов, включая наблюдения:

— сейсмических волновых полей в широком частотном и динамическом диапазонах;

— медленных движений (наклонов и деформаций);

— вариаций метеопараметров (давления, температуры и др.);

— параметров гидрогеологического режима.

Выбор тех или иных геофизических методов и их сочетание определяется конкретно поставленной задачей, типом контролируемого объекта и его расположением. Очевидно, что система контроля и методика наблюдений транспортных вибраций в больших городах будет отличаться от системы контроля и методики наблюдений атомных станций или токсичных захоронений. Контроль объектов, расположенных в сейсмически опасных зонах, потребует организации предупреждающих систем. Контроль железнодорожных магистралей с позиции выделения потенциально опасных зон будет иным, нежели контроль тех же путей с позиций выявления кавернозных полостей и подмывов в железнодорожном полотне и подстилающих грунтах. При решении разных задач выбирается разный набор геофизических методов, при этом одни и те же технические средства используются в разной конфигурации, различаются также методика наблюдений и последующие алгоритмы обработки данных.

2. ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

КБ "Геофизприбор" РАН производит разработку, конструирование и изготовление аппаратуры, начиная с уникальных первичных преобразователей для измерения геофизических параметров и кончая автоматизированными цифровыми системами и регистрирующими комплексами с использованием новейших достижений электронной технологии, материаловедения и средств вычислительной техники. Выпускаемая аппаратура проходит метрологическую проверку на уникальном стендовом оборудовании. В последние годы КБ проводит собственные научно-методические работы в области контроля техногенных процессов. Имеется опыт в организации как стационарных систем наблюдений с передачей данных в центр сбора и обработки информации, так и передвижных одиночных систем и групп на базе портативной аппаратуры.

В последние годы в КБ разрабатываются и выпускаются сейсмические и геофизические комплексы, предназначенные для решения при-

кладных задач геофизического контроля. Сюда относятся:

— системы геофизического контроля подземных захоронений токсичных отходов и нефтяных месторождений;

— аппаратура для геофизического контроля безопасности атомных и гидроэлектростанций;

— аппаратура для контроля техногенных вибраций;

— системы геофизического мониторинга городов, а также отдельных зданий и сооружений города;

— аппаратура геофизического мониторинга на дне акваторий.

Кроме выпуска аппаратуры, КБ "Геофизприбор" занимается также организацией наблюдательных сетей и, по крайней мере на начальной

стадии, участвует в проведении наблюдений и обработке получаемой информации.

2.1. Датчики

Датчики первичной информации, преобразующие физические процессы в электрический сигнал составляют наиболее сложную часть практически любой геофизической системы. КБ "Геофизприбор" имеет многолетний опыт их разработки, конструирования и калибровки. Датчики КБ отличаются высокой надежностью и оригинальной конструкцией, некоторые из них уникальны. Выпускаемые приборы обладают широким частотным и динамическим диапазоном, высоким разрешением и стабильностью и соответствуют современным техническим требованиям, превосходя по ряду характеристик зарубежные аналоги. Именно эти особенности при

Табл. 1. Сейсмоприемники КБ "Геофизприбор" РАН

Основные характеристики	Сейсмоприемники		
	СМ-3КВЭ	СМ-4	СМ-4Б
Рабочий диапазон частот, Гц	0.5–100	0.03–40	0.006–20
Коэффициент преобразования	$200-8 \times 10^5$ В·с/м	200 В·с/м	1.3 В·с ² /м
Динамический диапазон не менее	120	120	110
Электропитание:			
— напряжение, В	± 12	± 12	± 12
— потребление не более, Вт	0.2	0.2	0.2
Масса, кг	8.2	2.5	2.5

значительно меньшей стоимости делают их конкурентоспособными на мировом рынке геофизической аппаратуры.

2.1.1. Сейсмоприемники. Необходимость высокоточных измерений при большом динамическом диапазоне делает сейсмоприемник наиболее сложным, трудоемким и дорогостоящим элементом всей системы сейсмической регистрации. В настоящее время КБ "Геофизприбор" РАН располагает набором сейсмоприемников, представленных в табл. 1. В основном это — электронные приборы с обратными связями, соответствующие современным мировым требованиям.

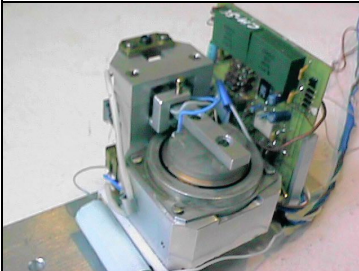
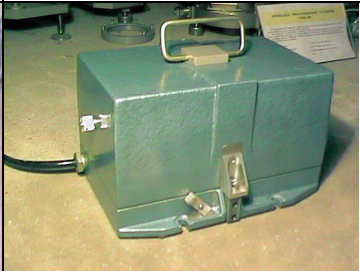
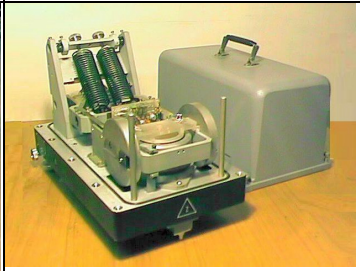
Все датчики предназначены для измерения скоростей смещений, но могут быть переориентирова-

ны на регистрацию смещений и ускорений. На базе датчиков СМ-4 и СМ-5 разработаны варианты донных приборов для работы на дне акваторий.

Частотный состав сейсмических колебаний характеризуется широким диапазоном от тысячных долей герца до тысячи герц, что не позволяет создать универсальный сейсмоприемник, перекрывающий весь этот интервал. Поэтому были разработаны группы приборов, частотный диапазон которых определяется типом и частотным составом регистрируемых сейсмических колебаний.

2.1.2 Датчики для измерения медленных движений, метео- и гидрогеологических параметров. КБ "Геофизприбор" производит следующие типы вышеуказанных датчиков (табл. 2):

Табл. 1 (продолжение)

Основные характеристики	Сейсмоприемники		
	СМ-5	СМ-3Е	КСЭШ-Р
			
Рабочий диапазон частот, Гц	0.05–40	0.01–30	0.0028–10
Коэффициент преобразования В·с/м	200	800	3000
Динамический диапазон, не менее	120	120	120
Электропитание: — напряжение, В	± 12	± 12	± 12
— потребление, не более, Вт	0.2	0.2	1.2
Масса, кг	0.9	8.2	20

Примечание: все сейсмоприемники выполняются в скважинной (кроме КСЭШ-Р), постаментной и трехкомпонентной модификациях

- наклономер маятниковый двухкоординатный НМД-Ш;
- деформометр кварцевый КД-Ч;
- нивелир гидростатический ГН;
- уровнемер манометрический ДУ;
- измеритель вариаций атмосферного давления ДА;
- измеритель вариаций температуры ДТ.

Первые три датчика производят регистрацию медленных движений и соответственно предназначаются для долговременных измерений наклонов земной поверхности или какого-либо сооружения относительно отвесной линии (гравитационной вертикали), вариаций расстояния между двумя или несколькими точками земной поверхности или сооружения и вариаций вертикальных смещений точек, разнесенных по земной поверхности.

Уровнемер используется для долговременных измерений вариаций уровня воды или некоторых других жидкостей в скважинах. Два последних датчика предназначены для измерения вариаций атмосферного давления и температуры окружающей среды.

Все датчики созданы на основе единой технологии и характеризуются долговременной стабильностью и большим динамическим диапазоном при высокой пороговой чувствительности. При необходимости чувствительность датчиков может быть изменена.

2.2. Системы регистрации

2.2.1. Основные принципы. Геофизические цифровые регистраторы, оснащенные комплектом датчиков, составляют основу многофункциональных геофизических наблюдательных сетей, предназначенных для фундаментальных и прикладных исследований. Для них характерны общие принципы построения вне зависимости от регистрируемой величины и решаемой задачи. Главным при их разработке является создание унифицированного ядра по сбору и обработке информации на основе качественно новых компонент электронной и компьютерной технологии широкого пользования. С этой целью КБ широко использует мировой электронный и компьютерный рынок. Комплексование этих компонент с оригинальными датчиками КБ обеспечивает выпуск недорогих и конкурентоспособных регистрирующих геофизических систем высокого качества.

КБ "Геофизприбор" к настоящему времени располагает тремя типами цифровых регистраторов: стационарный одномашинный, стационарный двухмашинный и портативный.

Первые два ориентированы на оснащение стационарных наблюдений с установкой в специально оборудованных помещениях и обсерваториях и

используют персональные компьютеры типа IBM PC. Портативный регистратор предназначен для работ в полевых условиях и производит запись данных на базе компьютера типа Notebook.

Двухмашинный регистратор представляет собой локальную вычислительную сеть и позволяет вести долговременную непрерывную регистрацию процессов с большим объемом входной информации, а также осуществлять первичную обработку данных. Этот регистратор используется преимущественно в системах сейсмической записи. В одномашинном и портативном регистраторах объем памяти ПЭВМ ограничивает длительность непрерывной регистрации и возможности предварительной обработки.

Геофизическая информация различается в основном объемом входных данных. Для быстрых сейсмических процессов с частотой опроса до 100 Гц на канал и выше необходимы достаточно мощные и дорогие компьютеры, обеспечивающие прием и обработку большого потока данных. Для медленных процессов с низкой частотой опроса (менее 1 отсчета в секунду) жесткие требования к мощности компьютера снижаются. Отсюда также следуют различные требования к программному обеспечению систем регистрации быстрых и медленных геофизических сигналов.

Кроме того, конструктивные особенности сейсмоприемников и датчиков медленных движений для обеспечения связи с ЭВМ требуют контроллеров принципиально различного типа, для управления которыми требуется специальное программное обеспечение.

Программное обеспечение составляет существенную часть цифровых систем регистрации. При записи геофизических и особенно быстрых сейсмических процессов в реальном времени представляется нерентабельным использовать существующие сложные операционные системы типа Windows. Эти системы, занимая большой объем оперативной памяти, повышают требования к мощности и, следовательно, стоимости компьютера, замедляют процедуру приема входных данных, а при большой частоте опроса могут с ней не справиться. Кроме того, вследствие ненадежности программной оболочки Windows снижается надежность работы ПЭВМ и, следовательно, самого регистратора вплоть до остановки регистрации и потери данных. Поэтому программное обеспечение систем регистрации в КБ ведется на языках Паскаль и Ассемблер в системе MS DOS. Подобный подход позволяет создавать относительно недорогие и надежные геофизические системы. Тем не менее программы, разработанные для MS DOS, могут работать в системе Windows в монопольном режиме MS DOS, а для портативных регистраторов имеется программное обеспечение под управлением Windows.

Табл. 2. Датчики КБ "Геофизприбор" для измерения медленно изменяющихся параметров

Технические характеристики	Наклономер маятниковый, 2-коорд.	Деформометр кварцевый	Нивелир гидростатический	Уровнемер	Измеритель вариаций атмосферного давления	Измеритель вариаций температуры
Предельное разрешение	$5 \cdot 10^{-4}$ угл. с	$5 \cdot 10^{-4}$ мкм	$5 \cdot 10^{-3}$ мкм	$5 \cdot 10^{-4}$ м	5 Па	10^{-2} °С
Диапазон измерений	± 30 угл. с	± 300 мкм	± 5 мм	От 0 до 5 м	От 90 до 110 кПа	От + 4 до + 50 °С
База измерений	15 см	До 300 м	До 300 м	Глубина погружения в скважину до 300 м	—	—
Рабочий диапазон частот (Гц)	$0 \div 0.01$ Гц	$0 \div 0.01$ Гц	$0 \div 0.01$ Гц	$0 \div 0.01$ Гц	$0 \div 0.01$ Гц	$0 \div 0.01$ Гц
Коэффициент преобразования	$\geq 10^{-4}$ угл. с / Гц	$\geq 10^{-4}$ мкм/Гц	$\geq 10^{-3}$ мкм/Гц	≥ 0.1 мкм/Гц	≥ 1 Па/Гц	$\geq 3 \cdot 10^{-3}$ Рс/Гц
Динамический диапазон, дБ	120	120	120	80	80	80
Габаритные размеры	$\varnothing 70 \times 150$	$200 \times 150 \times 120$	$\varnothing 150 \times 132$	$\varnothing 86$ $h \leq 145$	$\varnothing 86$ $h = 126$	$\varnothing 81$ $h = 145$
Масса, кг (один датчик)	≤ 3.5	≤ 5	≤ 6	2.4	≤ 3.5	≤ 3.5

Примечание: электропитание –12 В, 0.2 Вт; долговременная стабильность параметров на уровне точности измерений не менее 5 лет

Стандартное программное обеспечение используется также для первичной обработки уже зарегистрированных данных, поскольку формат их записи совпадает с требованиями существующих пакетов обработки.

В КБ "Геофизприбор" разработаны многоканальные системы регистрации с числом каналов от 1 до 32 для сейсмических сигналов и до 64 — для медленных процессов. Разработанное программное обеспечение предусматривает задавать основные параметры регистрации (число каналов, частота опроса, чувствительность регистрации, частотный диапазон и т.д.). Сочетание многоканальных регистраторов с гибким программным обеспечением позволяет без существенных затрат

создавать разнообразные геофизические станции и сети наблюдений, состав и конфигурация которых определяются поставленной задачей.

2.2.2. Сейсмические комплексы. На базе сейсмоприемников и многоканальных регистраторов в КБ "Геофизприбор" РАН разработаны следующие сейсмические стационарные комплексы, оснащенные сейсмоприемниками нового поколения (табл. 1).

1) Длиннопериодный широкополосный комплекс КРС-ДПШ с использованием широкополосного сейсмоприемника СМ-3Е. Для оснащения сейсмических обсерваторий используется высокоточный и высокостабильный сверхдлиннопериодный сейсмоприемник КСЭШ-Р.

2) Среднепериодный широкополосный комплекс КРС-СП, оснащенный сейсмоприемниками СМ-4, СМ-4Б или СМ-5.

3) Короткопериодный комплекс КРС-КП, использующий последние электронные модификации хорошо известного короткопериодного сейсмоприемника СМ-3КВЭ.

Для полевых сейсмических наблюдений в КБ разработана портативная цифровая сейсмическая станция "Экспресс-4". Аппаратура станции предусматривает ее эксплуатацию в полевых условиях применительно к широкому кругу научных и прикладных задач. Станция оснащена комплектом сейсмоприемников СМЗ-КВЭ, или СМ-4, или СМ-4Б, или их комбинацией с общим числом каналов от 1 до 6.

2.2.3. Геофизические комплексы. Датчики медленных движений могут быть объединены в наклонмерно-деформометрические и уровнемерные комплексы с единой цифровой системой регистрации. В настоящее время в КБ разработан комплекс аппаратуры геофизического мониторинга. Он состоит из набора геофизических датчиков, представленных в табл. 2, и системы регистрации, построенной на основании изложенных выше принципов аналогично сейсмическим системам. Общее количество датчиков в системе и распределение их по типам зависит от задачи и объекта исследований и меняется от 1 до 64. Персональный компьютер оснащен специально разработанным программным обеспечением.

2.2.4. Метрологическая аттестация. Все разрабатываемые в КБ датчики и комплексы проходят необходимую калибровку с использованием прямых или/и косвенных методов. Для выполнения этих работ в КБ имеются специальные стенды, устройства, приспособления и соответствующее программное и методическое сопровождение. Разработанные процедуры калибровки позволяют с высокой точностью определять измеряемые физические величины. Специальные сейсмические стенды являются рабочим эталоном метрологической службы Госстандарта.

3. НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИМЕРЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТУРЫ В РОССИИ

В качестве примеров практического использования аппаратуры КБ "Геофизприбор" РАН на рис. 1 представлен комплекс аппаратуры геофизического мониторинга г. Москвы, установленный на постаменте в помещении КБ. Этот комплекс является одним из наблюдательных пунктов системы геофизического контроля г. Москвы.

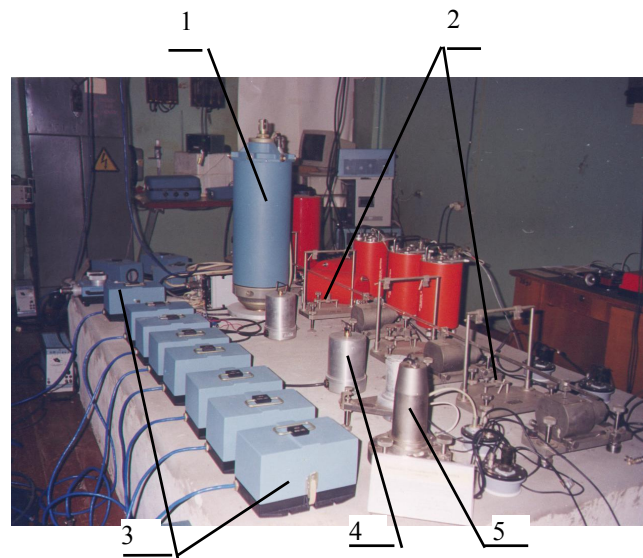


Рис. 1. Комплексный геофизический пункт мониторинга г. Москвы в КБ "Геофизприбор" РАН.

1 — сейсмоприемник трехкомпонентный скважинный СТС, 2 — кварцевый деформометр КД, 3 — сейсмоприемник электронный СМЗ-КВЭ, 4 — сейсмоприемник электронный вертикальный СМ-4.2В, 5 — наклонмер двухкоординатный штольневый НМД-Ш

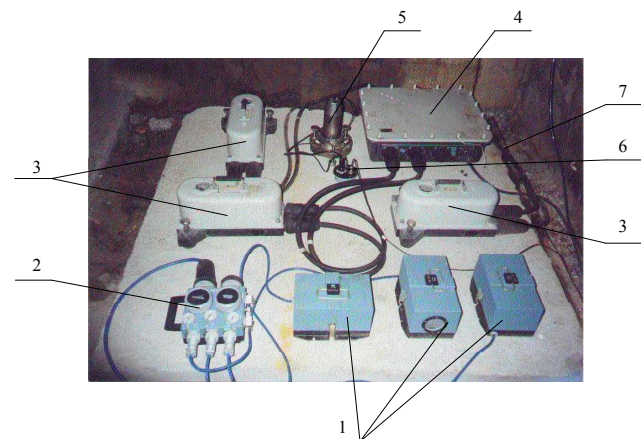


Рис. 2. Комплексный геофизический пункт наблюдения полигона токсичных отходов "Северный" Горно-химического комбината (г. Красноярск).

1 — сейсмоприемники электронные СМЗ-КВЭ, 2 — коробка распределительная ПЦСС-3.КР, 3 — сейсмоприемники ССМ-С, 4 — блок электроники ССМ-БЭ, 5 — наклонмер маятниковый двухкоординатный штольневый НМД-Ш, 6 — устройство согласования геофизического датчика УСГД1, 7 — кабель датчика температуры ДТ-2

На рис. 2 дан пример практического применения аппаратуры КБ на особо важных объектах России.

Работы по указанным направлениям выполняются высококвалифицированными специалистами КБ "Геофизприбор" РАН с поставкой

необходимой аппаратуры, проведением пусконаладочных работ и сдачей "под ключ".

КБ "Геофизприбор" РАН, Москва

Материал поступил в редакцию 04.07.2001.

GEOLOGICAL INSTRUMENTATION FOR EXPLORATION AND MONITORING OF ENGINEERING STRUCTURES AND ENVIRONMENT FOR SAFETY ASSURANCE

I. P. Bashilov

Design Bureau "Geophyspribor" RAS, Moscow

In some cases to prevent dangerous situations, there is a need for unconventional methods and devices for monitoring both the objects and environment. Some methods and systems for such monitoring can be implemented using the advances in geophysical science and instrumentation. For the last two decades a geophysical monitoring technique has been developed, which involves observation of time variations of geophysical parameters, including the long-period ones.