

Е.А.РОГОЖИН, д-р геол.-минер. наук,  
Н.К.КАПУСТЯН, д-р физ.-матем. наук,  
Г.А.АНТОНОВСКАЯ, канд. техн. наук  
(ИФЗ им.О.Ю.Шмидта РАН, Москва),  
Р.Т.АКБИЕВ, канд. техн. наук  
(ЦНИИП градостроительства РААСН, Москва)

## МЕТОДОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ, ВКЛЮЧАЯ ПЛОЩАДКИ ИХ РАЗМЕЩЕНИЯ

*Настоящая статья содержит обобщение опыта применения различных схем наблюдений за техническим состоянием зданий и сооружений и возможностей их комплексирования. Показано, что при использовании современной аппаратуры их можно достаточно просто сочетать в единой методологии мониторинга. Установлен перечень основных схем мониторинга, различие которых определяется назначением объекта, его объемно-пространственной композицией, конструктивным решением, степенью целостности, характеристиками вмещающей геологической среды, параметрами внешних природных и техногенных воздействий.*

*Ключевые слова: инженерно-сейсмологический мониторинг, регистрирующая аппаратура, схемы наблюдений, методика обработки данных, реконструкция систем мониторинга*

### Введение

В настоящее время существует широчайший набор видов объектов различного назначения: от археологических и исторических построек до ответственных инженерных сооружений. Одни здания проектируются и только строятся, другие активно эксплуатируются, определенный вид объектов требует реставрации или бережной консервации. Однако общим для всех них является необходимость оценивать их состояние, следить за его изменением, выявлять критические ситуации для безопасности объектов – их причины и возможные последствия, на основании чего принимать решения по обеспечению безопасности.

Эти сложнейшие задачи решаются как натурными наблюдениями на объектах, так и с привлечением теоретических и математических моделей поведения объекта при воздействиях и рассмотрением сценариев развития процессов.

Натурные наблюдения в настоящее время выполняются разнообразными инструментами и методами (геотехническими, инженерно-геофизическими, химическими и пр.). Среди них сейсмометрия занимает особое место по информативности получаемых данных, существенных

как для оценки состояния объекта, так и для выявления внешних опасных воздействий, причем с элементами прогнозирования на будущее.

Опыт обследования зданий и сооружений различных типов, а также построения систем мониторинга с использованием сейсмометрии показал, что на самом деле для многообразия объектов применимы несколько довольно общих схем наблюдений и приемов обработки и интерпретации данных. Основа этого – кардинальные изменения, произошедшие в аппаратуре: разработка новых типов сейсмометров и цифровых способов регистрации сигналов. Одним из следствий является возможность одним типом датчиков регистрировать сейсмические сигналы, которые пригодны для применения различных методик. Именно этот факт и послужил основой для создания «Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения».

Настоящая публикация содержит основную методологию мониторинга – систему понятий и технологию применения основных схем наблюдений.

Существенно, что особое внимание уделяется области применения каждого из рассматриваемых основных типов аппаратуры, что призвано оградить создаваемые системы мониторинга от ошибочных решений.

### Основные виды сейсмометрического мониторинга

Сейсмометрический мониторинг в соответствии с ранее принятой практикой подразделяют на сейсмологические и инженерно-сейсмометрические наблюдения (мониторинг).

Сейсмологические наблюдения выполняют так называемый сейсмологический мониторинг района размещения объекта<sup>1</sup> с целью уточнения сейсмических воздействий на объект – природных, техногенных или природно-техногенных (например, наведенной сейсмичности). Сейсмологический мониторинг производится в следующих случаях:

- объект является ответственным инженерным сооружением;
- объект расположен в районе с сейсмической активностью, принимаемой к учету при проектировании в соответствии с отраслевыми нормами;
- функционирование объекта может

<sup>1</sup> Район размещения объекта – территория, включающая площадку объекта (территория в пределах охраняемого периметра, где размещены основные и вспомогательные здания и сооружения), на которой возможны сейсмические явления, способные оказать влияние на безопасность объекта.

привести к изменению сейсмического режима территории размещения<sup>2</sup>;

- функционирование объекта связано с возможностью возникновения техногенных сейсмических проявлений<sup>3</sup>.

Сейсмологический мониторинг включает набор стационарных или временных сейсмологических станций, образующих локальную сейсмологическую сеть. Станции могут работать в режимах: непрерывном или ждущем (регистрация только событий, превышающих заданный уровень). Данные локальной сети должны иметь возможность сопрягаться с региональной (территориальной) сейсмологической сетью. Наблюдения локальной сети ведутся для всех станций в едином времени, формат времени должен соответствовать стандарту региональной сети, точность – не хуже, чем в региональной сети. Количество станций и их размещение на территории устанавливается с учетом рекомендаций, приведенных в настоящей статье. Станции должны иметь привязку по координатам с точностью, не хуже чем в региональной сети.

Инженерно-сейсмометрический мониторинг выполняется непосредственно на объекте – в объеме здания сооружения и во вмещающей его геологической среде, в первую очередь в места его сочленения с ней – в основании объекта, в бортах плотин и пр., с целью выявления изменений, могущих приводить к нарушению целостности или работоспособности объекта.

Инженерно-сейсмометрический мониторинг может проводиться для широкого круга объектов, в том числе:

- для сооружений различного назначения на АЭС;
- на гидротехнических сооружениях, в том числе плотинах и зданиях комплекса;
- для жилых, общественных и промышленных зданий, особенно высотных и большепролетных;
- для подземных сооружений;
- на мостах и дорогах разного назначения;
- для трубопроводов и станций перекачки, резервуаров хранения нефти и газа;
- на космодромах;
- для историко-архитектурных сооружений и памятников;

- в зонах опасных геологических процессов (на оползневых склонах, в зонах развития карста и пр.).

Инженерно-сейсмометрический мониторинг может выполняться самостоятельно или входить в комплекс совместно с другими методами, использующими как сейсмометрию, так и другие методики и инструменты. Наиболее распространены сочетания с наблюдениями:

- геодезическими;
- напряженно-деформированного состояния конструкций и грунтов оснований;
- фильтрации флюидов;
- региональными, сейсмологическими и сейсмологическим мониторингом;
- уровнем вибрации агрегатов;
- ультразвуковыми, с регистрацией потоков импульсов;
- инфразвука.

Инженерно-сейсмометрический мониторинг может быть настроен на использование как одной методики, так и одновременно комплекса методик обработки и анализа данных. Основные методики инженерно-сейсмометрического мониторинга опираются на выявление:

- реакции сооружения на импульсные или квазиимпульсные<sup>4</sup> внешние природные, техногенные или специально создаваемые искусственные воздействия. Это, соответственно землетрясения, промышленные взрывы, действие специализированных устройств, возбуждающих механические колебания;
- собственных колебаний зданий и сооружений;
- вынужденных колебаний вследствие работы внутренних или удаленных техногенных источников механической вибрации;
- микроимпульсов, связанных с дефектами материалов конструкций или горных пород с оценкой статистических свойств потоков этих импульсов.

К другим видам сейсмометрического мониторинга относятся наблюдения, связанные с контролем работы оборудования (уровнем механических вибраций), ультразвуковая дефектоскопия, слежение за деформационными процессами в земной коре и пр. Эти виды мониторинга имеют либо узкоотраслевое применение, регу-

лируемое соответствующими нормами и правилами, либо носят научно-исследовательский характер и применяются достаточно редко.

### **Сигналы, используемые при мониторинге и аппаратура для их регистрации** **Параметры сигналов сейсмометрического мониторинга**

Сейсмические сигналы принято подразделять в соответствии с частотным диапазоном, уровнем, рисунком записи (волновыми формами), длительностью и ритмом возникновения.

В соответствии с частотным диапазоном и исходя из традиционно принятых геофизических методов, сигналы условно разделяются на:

- сейсмологические – от 0,1 Гц (иногда от 0,01 Гц) до примерно 20 Гц;
- сейсмические – от 1 до примерно 100 Гц, диапазон сейсмических исследований земной коры;
- высокочастотные сейсмические – сотни Гц, малоглубинная сейсморазведка и вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП);
- акустические и ультразвуковые – от сотен Гц до кГц, сейсмоакустика, прозвучивание, каротаж.

Следует отметить, что термин «сейсмические» часто используется как общий, т.е. когда рассматривается природа сигнала вне зависимости от частотного диапазона.

По уровням (амплитудам) сейсмические сигналы принято разделять на:

- слабые – амплитуда которых сравнима с уровнем микросейсм или ниже их уровня;
- «выделяемые» на фоне помех, т.е. по амплитуде в несколько раз больше уровня микросейсм;
- так называемые «сильные движения», записи в эпицентральной зоне ощутимых землетрясений.

По волновым формам сейсмические сигналы принято разделять на:

- импульсные, представленные несколькими фазами, как правило, с достаточно четким первым вступлением;
- гармонические или квазигармонические, с постоянной или медленно меняющейся частотой сигнала;

<sup>2</sup> Примерами явлений, провоцирующих изменение сейсмичности, являются наполнение водохранилищ, закачка отходов и пр. В этих случаях необходимость сейсмологического мониторинга должна содержаться в специальных технических требованиях для объекта.

<sup>3</sup> Например, падения ступеней ракет.

<sup>4</sup> Геофизические зондирующие сигналы сложной формы или действие строительных вибрационных машин, волновые формы свертываются с сигналом в источнике для получения волновой формы, близкой в импульсной.

- вибрационные – искусственные сигналы вибрационных исследований, представленные разнообразными законами изменения амплитуд и частот (например, свип-сигналы с плавно меняющейся частотой);

- случайные или шумовые сигналы, составляющие основу микросейсм.

По длительности различают короткие (импульсы) и длительные – от нескольких минут до постоянно присутствующих (например, микросейсм). По ритму обычно отмечают сигналы с известным временем появления (например, взрывы) или спорадические (микротрески).

Параметры сейсмических сигналов, информативных для различных видов мониторинга, типы регистрирующей аппаратуры, а также объекты мониторинга, использующие сигналы, приведены в табл.1. Сейсмометрическая регистрирующая аппаратура условно разделена на типы А, Б, В, описание которых дано ниже.

### Регистрирующая аппаратура

Современная сейсмометрическая аппаратура включает следующие основные блоки:

- сейсмометры – датчики колебаний;
- усилители, иногда каскад усилителей и фильтры;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- часы или привязка к точному времени;
- устройства для осуществления калибровки;
- средство регистрации (на флеш-память, удаленный прием с передачей данных по проводам или радиоканалу);
- электропитание.

Блоки могут объединяться, например, современные АЦП работают как усилитель.

Современные сейсмометры выполняют наблюдения колебаний: линейных и крутильных, первые – наиболее распространены.

По регистрируемым величинам различают велосиметры (скорость смещения точки или колебательную скорость, иногда применяют термин виброскорость) и акселерометры (ускорения, виброускорения).

По регистрируемому частотному диапазону применяются широкополосные или узкополосные (резонансного типа) сейсмометры.

При наблюдениях используются однокомпонентные или многокомпонентные сейсмометры. Наиболее распространены 3-х компонентные с ортогональной ориентацией осей регистрации Z, X, Y – по вертикали и в горизонтальной плоскости соответственно.

При подборе типов аппаратуры следует ориентироваться на следующие параметры, которые требует используемая методика:

- частотный диапазон;
- минимальный или максимальный уровни сигналов, динамический диапазон;

Таблица 1.

Параметры сигналов сейсмометрического мониторинга

№	Сейсмический сигнал	Частоты, Гц	Уровень сигнала	Объект мониторинга	Вид мониторинга	Тип аппаратуры
1.	Природные и техногенные сейсмические импульсные события	0,1-20	единицы м/с <sup>2</sup>	Здание или сооружение, технологическое оборудование, вмещающие горные породы	Сейсмол., инж.-сейсм	А
2.	Действие специальных устройств, в том числе геофизических вибраторов	1-100	до 1 м/с <sup>2</sup>	Здание или сооружение, вмещающие горные породы	Инж.-сейсм	А
3.	Транспорт: автомобильный, железнодорожный и метро	5-15 1-20	до 0.1 мм/с <sup>2</sup> до 1 мм/с <sup>2</sup>	Здание или сооружение, вмещающие горные породы	Инж.-сейсм	А
4.	Ударные воздействия при строительстве – устройство свайных полей, способы: ударный виброзадавливание	10-100	~0.1 м/с <sup>2</sup> ~0.01 м/с <sup>2</sup>	Здание или сооружение, вмещающие горные породы	Инж.-сейсм	А
5.	Вибрации при пусках или остановках мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС	N (число об/мин)	до 0,5 м/с <sup>2</sup>	Плотины, здания ГЭС, оборудование, горные породы бортов водохранилища	Инж.-сейсм.	А
6.	Механические вибрации при работе мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС	единицы-десятки	100 мм/с <sup>2</sup> - 1 мкм/с <sup>2</sup> *	Плотина, здания ГЭС, оборудование, горные породы бортов водохранилища	Инж.-сейсм.	А
7.	Собственные колебания зданий и сооружений	0,1-20	10 мкм/с <sup>2</sup> и более	Здание или сооружение, вмещающие горные породы	Инж.-сейсм.	А
8.	Микросейсм, потоки микротресков	0,2-30 10-100	1 мкм/с <sup>2</sup> и более	Горные породы, геодинамика региональных разрывных нарушений	Сейсмол., инж.-сейсм.	А
9.	Сейсморазведка грунтов оснований малоглубинная, ВСП	до 500	единицы мм/с <sup>2</sup>	Грунты основания здания или сооружения	Инж.-сейсм.	Б
10.	Акустические и ультразвуковые исследования материалов	1000 и более	-	Здание или сооружение, вмещающие горные породы	Дефектоскопия	Б, В

\* Значение приведено для удаления от ГЭС ~ 10 км, характерным для размещения станций сейсмологического мониторинга.

- стабильность амплитудно-частотной характеристики регистрирующего тракта во времени и при изменении внешних условий (температуры, атмосферного давления и пр.);

- помехозащищенность (особенно при работе на промышленных объектах);

- условия осуществления электропитания;

- способы хранения или передачи данных;

- возможность связи с другими станциями;

- привязка к точному времени, возможность калибровки без демонтажа оборудования;

- защищенность от внешней среды, особенно агрессивной.

При использовании для мониторинга методик, основанных на анализе так называемых кинематических характеристик (времен вступлений импульсных сигналов) или работающих на обнаружение интенсивных сигналов допустимо использовать практически любые типы сейсмометров. Если анализируются динамические характеристики записей (амплитуды, спектры) или выполняется выделение слабых сигналов методом накопления (фильтрации), следует подбирать типы сейсмометров с линейной зависимостью сигнала на выходе от сигнала на входе. Например, использование датчиков с пьезоэлементами, характеризующихся присутствием гистерезиса, не рекомендуется.

При проектировании систем сейсмометрического мониторинга допускается использование в одной системе сейсмометров, регистрирующих разные физические величины (велоисмометров и акселерометров), а также разного типа и с разным частотным диапазоном. В тех случаях, когда предполагается наличие внешних динамических воздействий на здание или сооружение (землетрясений,

взрывов, транспорта), в системе в ключевых точках объекта и площадки должны размещаться акселерометры для получения акселерограммы реального воздействия и возможности использования этих данных в строительных расчетах.

Наиболее распространенные по применению современные сейсмометры условно могут быть разделены на три типа (А, Б, В) в соответствии с возможностями для мониторинга зданий и сооружений (табл.2).

При проектировании систем мониторинга следует ориентироваться на применение датчиков с наиболее широкими возможностями регистрации и избегать сейсмометров узкоспециализированных – они могут дополнять систему при необходимости, но не быть основными. Это требование связано с концепцией использования единого датчика для регистрации сейсмического поля и последующим применением к полю различных методик обработки.

К специализированным сейсмометрам относятся следующие:

- резонансные сейсмометры, ориентированные на регистрацию высокочастотных сейсмических шумов в задачах прогноза землетрясений;

- относительно «грубые» датчики, не соответствующие по какому-либо основному параметру типам А-В;

- датчики крутильных колебаний;

- сейсмометрические датчики, осуществляющие обработку сигнала – энергометры, счетчики импульсов и пр.;

- сейсмометры экспериментальные или выпускаемые малыми сериями, а также датчики несертифицированные.

Выбор типа (или нескольких типов) датчиков для системы мониторинга зданий и сооружений должен предваряться рекогносцировочными наблюдениями на объекте. Назначение типов датчиков для стационарной системы мониторинга без

рекогносцировки по литературным данным или иным соображениям, как показывает опыт, приводит к существенному ухудшению информативности данных, чувствительности и качества системы мониторинга.

При проектировании систем мониторинга, характеризующихся сетью датчиков, важно осуществить возможность сведения всех получаемых данных в едином формате в единую базу с жесткой привязкой их по времени. При этом допустимо использование внутри системы локального времени при условии привязки всей системы к мировому точному времени. Точность привязки по времени внутри системы ( $\Delta t$ ) должны быть:

$$\Delta t \leq 0,1T_c, \tag{1}$$

где  $T_c$  – минимальный из периодов сигналов, динамические характеристики которых анализируются при мониторинге. Например, если система мониторинга использует две методики: подсчет количества высокочастотных импульсов и анализ относительно низкочастотных гармонических сигналов с периодом  $T_c$ , то для оценки точности временной привязки используют  $T_c$ , т.к. при анализе статистики импульсов динамика сигналов не рассматривается.

При использовании для мониторинга методик, основанных на анализе слабых сигналов или выделении сигналов из микросейсм, блок усилителей (или АЦП) должен быть максимально приближен к датчику. Это требование связано с тем, что выходные сигналы с датчика с амплитудами до 100 мВ могут быть сильно зашумлены электрическими помехами, наводимыми на линию, передающую сигнал с датчика к усилителю (АЦП). По опыту, допустимая длина линий – не более 50-100 м в зависимости от условий регистрации, на промышленных объектах линия должна быть значительно короче (до единиц метров).

Таблица 2.

Типы сейсмометров, применяемых при мониторинге зданий и сооружений

Тип	Полоса частот* Гц	Уровни сигналов min-max, приведены к ускорениям	Измеряемые величины	Традиционная область применения
А	от 0 до 100 0,5 -50	доли мкм/с <sup>2</sup> – единицы м/с <sup>2</sup>	ускорения скорости	Сейсмология, глубинная сейсморастворка, ГСЗ
Б	сотни	мм/с <sup>2</sup>	скорости	Малоглубинная сейсморастворка
В	тысячи			Акустический мониторинг, дефектоскопия, и ультразвуковые исследования

\* Не обязательно в линейной части амплитудно-частотной характеристики

При разработке технических требований для прокладки линий передачи данных необходимо предусмотреть максимальную их защищенность от агрессивной окружающей среды (в том числе молниезащиты) и вандальных воздействий. Ключевые точки системы мониторинга следует оснастить дублирующей линией передачи или системой сохранения данных на месте (например, на флеш-карту), тем самым предусмотреть для системы мониторинга аналог «черного ящика».

Для электропитания системы мониторинга (датчиков, устройств для сбора и передачи данных) необходимо предусмотреть резервное электропитание в течение как минимум нескольких часов.

Количество датчиков в системе мониторинга зданий и сооружений определяется особенностью объекта и может варьировать от 1 до сотни. Места расстановки датчиков должны быть согласованы с проектировщиком объекта или с эксплуатирующей организацией.

Аппаратура регистрации должна удовлетворять всем требованиям пожарной или иной безопасности, принятой на объекте.

#### **Методики обработки данных мониторинга**

Способы обработки сейсмических записей определяются происхождением и свойствами соответствующих сейсмических сигналов (табл.1).

Получаемые данные для каждого вида обработки собираются и накапливаются в центральном блоке мониторинга.

При сейсмологическом мониторинге взрывов и землетрясений принято производить первичную и углубленную обработку. При первичной обработке выполняется следующее:

- просмотр получаемых записей с выделением аномальных участков (визуально или автоматизировано);
- анализируются волновые формы, выделяются основные сейсмические волны (продольные, поперечные, поверхностные и пр.), определяются параметры, основные - времена вступлений;
- полученные волновые формы и величины времен вступлений на каждой станции локальной сети сопоставляются с таковыми для всех станций;
- величины параметров вносятся в базу данных, а также могут передаваться в региональную сейсмическую службу.

При углубленной обработке при нали-

чии нескольких станций в локальной сети сейсмометрического мониторинга объекта выполняют стандартный сейсмологический анализ:

- определение координат эпицентра;
- оценка возможной глубины гипоцентра;
- оценка энергии (энергетического класса или магнитуды);
- оценка балльности сотрясений для объекта (для относительно сильных событий);
- пополнение базы данных этими сведениями, организация локального каталога;
- для событий сильных и средней силы проводится сравнение полученных данных с региональными и мировыми каталогами;
- для сильных событий возможно проведение макросейсмических обследований на территории размещения объекта и станций.

При инженерно-сейсмическом мониторинге объекта при воздействии на него взрывов или землетрясений для сети датчиков выполняются те же процедуры, что и для сейсмологического мониторинга, особенно по первичной обработке. При углубленной обработке положение эпицентра и гипоцентра определяются совместно с данными станций сейсмологического мониторинга. Кроме того, углубленная обработка дополняется следующим:

- расчетом спектров реакции;
- получением с соответствующих датчиков акселерограмм события, при наличии нескольких датчиков – сопоставление акселерограмм, получение осредненной акселерограммы, организация каталога волновых форм акселерограмм с последовательным накоплением данных;
- оценка максимальных ускорений на объекте.

При воздействии на объект специальных устройств, возбуждающих сейсмический сигнал (в основном геофизических вибраторов или строительных вибромашин для испытаний зданий) обработка ведется в соответствии с методикой применяемого способа исследования.

При воздействии на здание или сооружение механических вибраций, создаваемых транспортом, выполняют:

- по цифровым записям расчет спектров действующего сигнала (по записям вне объекта) и спектров реакции, получаемые в различных точках объекта,
- по совокупности спектров реакции в

разных точках объекта строят амплитудно-частотную пространственную картину реакции, вариации которой со временем являются основой интерпретации при мониторинге объекта,

- на записях выделяют волновую форму, характерную для каждого вида транспорта, акселерограмму используют в качестве сейсмического воздействия, подаваемого в расчетную модель здания или сооружения. Результаты расчетов являются основой для разработки мер по виброзащите сооружения.

При ударных воздействиях, сопровождающих процесс строительства (наиболее распространенное – устройство свайных полей), на площадке объекта или в зоне окружающей застройки полученные записи обрабатывают подобно [1]. При возможности идентификации вступлений от ударов или выполнения операции свертки с данными в источнике, эти сигналы могут обрабатываться аналогично [1].

При обработке записей вибраций при пуске или остановке мощных электрических машин, излучаемый сейсмический сигнал подобен свип-сигналам вибрационной сейсморазведки.

При сейсмических наблюдениях постоянных или достаточно длительных вибрациях, излучаемых мощными электрическими машинами (частотами вращения: оборотной, двойной оборотной и др.), на записях инженерно-сейсмического или сейсмологического мониторинга объекта проводится выделение этих сигналов из фона микросейсм методом накопления (фильтрации). Учитывая, что значение частоты может «плавать» во времени относительно номинального значения, для выделения сигналов эффективно использование сигнала электрической сети как опорного при выделении. Для выявления генетической связи сигналов с работой электрических машин строят графики изменения во времени частот электрической сети и сейсмического сигнала.

В каждой точке регистрации для каждого значения частот определяют амплитуду и фазу колебания. По этим значениям для заданных моментов времени получают пространственное распределение амплитуд и фаз, за изменением этих полей следят при осуществлении мониторинга.

Собственные колебания зданий и сооружений обрабатываются следующим образом:

- на предварительном этапе мониторинга определяют значения собственных



частот различных мод (форм) колебаний объекта;

- на основном этапе мониторинга по записям инженерно-сейсмометрической сети датчиков определяют значения амплитуд и фаз собственных колебаний разных мод (форм) для каждой точки наблюдения;

- по полученным значениям строят пространственную картину перемещений в точках наблюдений на собственных частотах. Эти данные, получаемые с заданным интервалом времени, являются основой выявления изменений в конструкциях и свойств закрепления объекта во вмещающей среде. Кроме того, они сопоставляются с результатами строительных расчетов динамики объекта;

- данный вид обработки применяют как к линейным, так и к крутильным собственным колебаниям.

При обработке микросейсм выделяют из них рассмотренные выше сигналы. Дополнительно рассчитывают спектры мощности и функции когерентности - для компонент регистрации в каждой точке, которые заносят в базу данных. Кроме того, в базу заносят сведения о метеопараметрах (температуру, давление, скорость ветра и его направление) по данным региональной или локальной метеостанций.

Помимо сигналов, перечисленных выше, выделяют также сигналы, проявляющиеся в спектрах микросейсм в виде узкополосных пиков. Для этих сигналов ведут специальную обработку.

При расположении точки наблюдений в окрестности разрывных нарушений горных пород или дефектов в теле объекта обрабатывают микротрески (микроимпульсы, микрособытия), содержащиеся в микросейсмах.

При амплитудах импульсов, превышающих фон микросейсм, определяют максимальную амплитуду каждого импульса, количество импульсов в заданный отрезок времени, временной интервал между импульсами. Настройка обработки для каждого конкретного объекта производится на предварительном этапе мониторинга.

Если микроимпульсы меньше фона микросейсм, то поводят статистические оценки их потока. Для этого, в соответствии с [10, 14], рассчитывают функции когерентности попарно для компонент X, Y, Z, находят полосы частот, в которых устойчиво повышен уровень когерентности. Для заданного участка записи рассчитывают значения функции когерентности

компонент в скользящем временном окне. Полученные значения используют для составления статистической оценки - распределения (гистограммы) значений когерентности в выбранном частотном диапазоне. По изменениям параметров получаемого распределения судят об изменениях свойств потока микротресков, т.е. ведут мониторинг.

Обработку данных малоглубинной сейсморазведки, ВСП, акустоэмиссионных и ультразвуковых исследований ведут в соответствии со стандартными методиками, принятыми в соответствующей отрасли.

Цифровая обработка данных должна вестись с использованием стандартных программ, а также сертифицированных или апробированных программ и алгоритмов.

#### **Основные схемы наблюдений**

Пространственно-временные схемы (или, как принято в геофизической литературе, системы) представляют собой набор сведений о расстановке датчиков (их местоположении и ориентации осей регистрации), времени включения, длительности производимых записей, способах передачи данных и синхронизации. Кроме того, при использовании в одной системе датчиков разных типов указывается тип датчика в точке размещения. Пространственно-временные схемы наблюдений определяются объектом мониторинга и решаемыми задачами, а также свойствами соответствующих сейсмических сигналов (табл.1).

Наблюдения ведутся либо одним типом сейсмометров, либо допускается объединение в одной схеме нескольких типов датчиков.

1. Для наблюдения природных и техногенных сейсмических импульсных событий, землетрясений и взрывов, создают пространственную сеть из нескольких точек наблюдений, как правило, не менее 3-х для возможности локации эпицентра. Меньшее количество датчиков возможно, если на исследуемой территории уже существуют пункты сейсмологических наблюдений, данные которых возможно привлечь к обработке. Точки располагаются друг от друга на расстояниях от сотен метров (регистрация взрывов) или единиц километров для землетрясений. Как минимум одна точка должна быть расположена на исследуемом объекте. В отдельных специальных случаях проектируется так называемая сейсмическая

группа с более плотным расположением датчиков.

Конфигурация пространственного размещения точек определяется:

- решаемой задачей;

- расположением сейсмогенерирующей зоны и требованием точности локации событий [5, 9, 12];

- местными условиями возможности установки (доступностью точки, безопасностью размещения, типом электропитания и передачи данных).

В каждой точке производятся как минимум трехкомпонентные наблюдения по взаимно-ортогональным осям - 2 горизонтальным и 1 вертикальной, ориентация осей - как принято в сейсмологии: N-S (север-юг), E-W (восток-запад) и Z (по вертикали). Допустимо изменение ориентации осей, но с определением азимута поворота. Точки наблюдений должны быть привязаны к местности - к локальной топографической сети или иметь абсолютные координаты в системах GLONASS или GPS. Каждая точка наблюдений должна быть привязана к мировому точному времени. Каждая точка должна иметь цифровой или буквенный идентификатор (имя).

Наблюдения ведутся непрерывно либо кусочно-непрерывно по времени. При проектировании сети необходимо предусмотреть способ хранения и передачи данных в центр мониторинга или иную службу.

2. При регистрации сигналов от специальных устройств, в том числе геофизических вибраторов, организуют специальные сети наблюдений с линейной профильной или пространственной конфигурацией. Точки размещают как на объекте, так и на площадке его размещения или на изучаемой территории. Количество точек - от 1 и более. Обычно при возможности повторения воздействий назначенное количество точек наблюдений проходят небольшим количеством датчиков (расстановка - от 3 до десятка) с последовательным перемещением расстановки и присутствием корреляционной точки, совпадающей в последовательных расстановках [2, 3, 13]. Расстояние между точками выбирают исходя из поставленной задачи - от единиц до сотни метров. В каждой точке допустимы как 3-х компонентные наблюдения, так и регистрация 1 компоненты. Ориентация компонент: допустима как в п. 1, или в соответствии с конфигурацией объекта (например, по строительным осям или направлению на источник).

На предварительном (рекогносцировочном) этапе мониторинга проводят наблюдения большей плотности (меньшего расстояния между точками). В соответствии с результатами этапа выбирают ключевые точки и ведут мониторинг на более редкой сети. Время наблюдений планируется в соответствии с временем действия источника. Регистрируется интервал воздействия и участок шума до включения.

Наблюдения в точках могут вестись по локальному или мировому времени. При проведении мониторинга данные должны собираться в центре мониторинга в виде исходных цифровых массивов или результатов обработки.

3. При использовании сигналов, создаваемых транспортом (автомобильным, железнодорожным и метро) схема наблюдений подобна таковой в п.2. Время наблюдений: непрерывное или по расписанию движения.

4. Ударные воздействия при строительстве, как правило, связаны с устройством свайных полей. Применяемые способы: ударный, виброзадавливание. Схема наблюдений выбирается исходя из технических требований мониторинга этих воздействий. Исходной является схема, подобная таковой в п.2. Время наблюдений: либо непрерывное, либо в соответствии с расписанием работы устройств.

5. При наблюдении вибраций при пусках или остановках мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС, схема наблюдений подобна таковой в п.2. Время наблюдений: либо непрерывное, либо в соответствии с расписанием работы устройств.

6. При мониторинге с использованием механических вибраций при работе мощных электрических машин, в том числе агрегатов ГЭС, схема наблюдений подобна таковой в п.1 или в п.2. В соответствии с техническими требованиями

проведения мониторинга возможно объединение этих схем наблюдений на уровне применения единых способов обработки и дальнейшего анализа данных. При проектировании системы мониторинга существенно размещение одной из точек в зоне формирования сигнала (например, вблизи агрегата) для осуществления контроля параметров сигнала (контроль источника). Схема наблюдений по времени – либо по расписанию, либо непрерывно; последнее – при условии автоматической обработки данных. Для точек на объекте существенна работа в едином времени с заранее установленной точностью.

7. При мониторинге объекта с использованием собственных колебаний зданий и сооружений, схема наблюдений подобна таковой в п.2. Схема наблюдений по времени – либо по расписанию, либо непрерывно; последнее – при условии автоматической обработки данных. Для точек на объекте существенна работа в едином времени с заранее установленной точностью.

8. Наблюдения микросейсм, в том числе потоков микротресков, проводятся в отдельных точках: по площадной сетке или в одиночном выбранном месте. Стационарному мониторингу должен предшествовать предварительный этап с определением мест установки датчиков. Обязательным условием является 3-х компонентная регистрация в точке по взаимно-перпендикулярным осям X, Y, Z. Схема наблюдений по времени – либо по расписанию, либо непрерывно; последнее – при условии автоматической обработки данных. Регистрация должна иметь привязку в точному времени – локальному или мировому.

9. Сейсморазведка грунтов оснований зданий и сооружений, а также акустические и ультразвуковые исследования материалов проводятся по схемам для соответствующих геофизических и

акустических методик [4, 10-12, 11]. Выбор расположения точек измерений или профилей определяется расчетной зоной влияния объекта на вмещающую геологическую среду. Время выполнения работ и их повторения (мониторинг) определяются техническими требованиями мониторинга объекта.

Для повышения надежности и эффективности мониторинга рекомендуется комплексировать разные схемы наблюдений. При этом объединение наиболее эффективно производить на стадии интерпретации данных, т.е. после обработки массивов, полученных при применении соответствующих методик. В этом случае необходимо использовать математическую или физическую модель здания или сооружения, сведения о работе конструкций, а также представления о возможных механизмах изменений во вмещающих горных породах.

Результат инструментального мониторинга представляется в виде:

- массивов данных, полученных при обработке полей;
- схем, отражающих напряженно-деформированное состояние объекта;
- возможных механизмов процессов, вызвавших изменения, с оценкой их влияния на работоспособность сооружений.

При построении картины напряженно-деформированного состояния и выявлении механизмов процессов существенно привлекать другие виды мониторинга и данные КИА, а также лабораторные испытания материалов. Возможные сочетания схем наблюдений приведены в табл.3.

#### Создание и эксплуатация системы мониторинга

##### Этапы мониторинга

Развертывание сейсмометрической системы мониторинга здания или сооружения выполняется в несколько этапов:

- подготовительный этап;

Таблица 3.

Возможности комплексирования схем наблюдений при мониторинге объектов

№	Объект мониторинга	Регистрируемые сигналы	Схема наблюдения
1.	Высотные, большепролетные и уникальные здания	Собственные колебания, действие импульсных источников	Сеть точек по высоте и по плану здания
2.	Плотины ГЭС и гидросооружения, борта водохранилищ	Собственные колебания, вибрации при работе агрегатов, землетрясения, микроимпульсы	Сеть точек на плотине, точки у агрегатов, на бортах водохранилища, в районе размещения
3.	Резервуары большого объема	Импульсные сигналы, акустическая эмиссия, собственные колебания	Акустоэмиссионные обследования, точки на грунте и на резервуаре
4.	Исторические здания и памятники архитектуры	Собственные колебания, техногенные воздействия, транспорт, сейсморазведка	Точки на зданиях и сооружениях, профильные наблюдения на грунте

- предварительный (рекогносцировочный) этап;
- проектирование системы мониторинга;
- монтаж, пуско-наладочные работы;
- опытная эксплуатация;
- этап стационарной работы системы;
- реконструкция с совершенствованием системы.

Во время подготовительного этапа:

- подбирают сведения об объекте (чертежи, расчетные схемы, натурные обмеры, сведения: о предшествующих исследованиях, о сейсмическом режиме района и пр.), выявляют особенности объекта;
- намечают возможные методики и схемы проведения мониторинга;
- осуществляют подбор средств измерений и передачи данных.

На предварительном (рекогносцировочном) этапе производят следующие экспериментальные работы:

1. Подбор методик проведения мониторинга и способов их комплексирования в соответствии с техническими требованиями на систему мониторинга объекта.

2. Определение параметров проектируемой системы мониторинга:

- а) выбор типов датчиков для предполагаемых методик;
- б) опробование на объекте схем наблюдений и их настройка:

- при использовании импульсных сигналов, в том числе от специальных устройств, а также при регистрации собственных колебаний объекта, проводят наблюдения с достаточно большой плотностью расстановки датчиков (с меньшим расстоянием между точками), чем при стационарном мониторинге;
- при наблюдениях микротресков и микроимпульсов, особенно на массивах горных пород, опытным путем выбирают места установки датчиков.

3. Определяют технические возможности установки датчиков и передачи данных.

4. Проводят настройку регистрации путем выявления специфических параметров сигналов, используемых для мониторинга:

- определяют значения собственных частот колебаний объекта;
- настраивают частотный диапазон для обработки микротресков.

На этапе проектирования системы мониторинга выполняют следующее:

- а) проводят подбор нормативной документации по объекту, способам его обследования и требованиям к мониторингу,

а также рекомендаций по применению методик мониторинга. Эти разработки совместно с техническими требованиями служат основой для проектирования;

- б) выполняют проектирование в виде:
  - чертежей размещения оборудования, прокладки кабелей, разработки узлов крепления оборудования,

- пояснительной записки к проекту, в которой содержится обоснование применяемого оборудования, этапы производства работ, схема обработки данных, перечень программ обработки данных и основные требования к программному обеспечению оболочки, связывающей сбор и обработку данных, а также визуализацию и возможность удаленного доступа к просмотру результатов;

- в) определяют состав, распределение обязанностей и последовательность производства работ.

На следующем этапе производят монтаж оборудования (датчиков и кабельных сетей) и пуско-наладочные работы.

На этапе опытной эксплуатации системы определяют ее работоспособность, дорабатывают отдельные узлы системы, настраивают передачу данных, обработку материалов и способ представления результатов.

На этапе стационарной работы системы:

- осуществляют мониторинг объекта с представлением результатов в предусмотренном виде;

- контролируют работоспособность системы с проведением плановой профилактики и калибровки;

- проводят обучение обслуживающего персонала;

- накапливают банк данных по изменениям объекта, выявляют ритмы во времени, пороги изменений различных параметров, выход за которые требует дополнительных мероприятий;

- создают модель объекта, позволяющую учесть происходящие изменения (интерактивную модель). Модель может быть математической (например, конечноэлементной) или физической, пригодной для натурного моделирования;

- накапливают материалы о работе системы и пожелания эксплуатационников для возможности ее совершенствования.

По результатам стационарной работы системы определяют мероприятия и сроки ее реконструкции с целью совершенствования системы.

## Результаты мониторинга

Основным результатом мониторинга является обеспечение безопасности и целостности объекта. Это достигается путем выполнения следующих работ:

- а) по данным, получаемым на стационарном этапе мониторинга для каждого из полей используемых сигналов, проводят статистический анализ и выделяют аномальные изменения параметров. При статистическом анализе выявляют:

- периодичности и ритмы (технологические, суточные, годовые) и характерные для них вариации параметров;

- наличие трендов во времени, изменений их скоростей;

- взаимную корреляцию массивов данных разных типов, причем не только сейсмометрических, но и иных полей (температуры, давления, порового давления, уровня воды и пр.);

- б) анализируют данные на присутствие в параметрах признаков, известных как опасные по литературе или опыту;

- в) сопоставляют вариации инструментальных параметров с не инструментальными данными, в том числе с визуальным осмотром;

- г) проводят моделирование путем внесения в модель объекта изменений, которые дают для соответствующих параметров сходную картину с экспериментальными данными, анализируют влияние изменений на напряженно-деформированное состояние объекта или прочие его свойства;

- д) при появлении статистически аномальных отклонений или известных по опыту опасных явлений производят внеочередное детальное обследование объекта в соответствии с нормативами для данного типа зданий или сооружений.

По результатам обследования, в случае выявления неблагоприятного состояния, принимают дальнейшие решения, предусмотренные нормативами или распоряжениями.

В том случае, если отмечены аномальные явления, но обследование, выполненное по нормативам, не выявило изменений, прорабатываются схемы дополнительных более детальных обследований.

## Реконструкция существующих систем мониторинга

В соответствии с отраслевыми нормативными требованиями при проектировании и строительстве, здания и сооружения могли быть снабжены систе-



мами мониторинга, в том числе сейсмометрического. В том случае, если данные, собираемые в таких системах, не отвечают современным нормативным требованиям по автоматизации и диспетчеризации, эти системы сейсмометрического мониторинга подлежат реконструкции.

Реконструкция систем сейсмометрического мониторинга может сводиться к доработке существующих систем или практически полному изменению системы. Время проведение реконструкции определяется выпуском новых нормативов или обоснованными потребностями старой системы.

При доработке системы сохраняется ее, так называемая, архитектура: структура сбора и передачи данных, использование методик и сигналов и пр. При доработке проводятся следующие работы:

- замена отдельных устройств старого типа на новые, в том числе датчиков;
- добавление дополнительных точек наблюдений;
- добавление новых методик обработки сигналов;
- изменение способа представления данных, включение удаленных пользователей.

При полном изменении (замене) старой системы мониторинга производится замена архитектуры системы, что включает в себя одновременное изменение следующих узлов:

- датчиков сбора данных (типов сейсмометров или изменении чувствительности применяемых);
- схемы аналого-цифровых преобразований и передачи данных,
- линий передачи данных (беспроводная или по проводам,
- привязки данных к абсолютному времени;
- алгоритмов сбора, обработки и визуализации данных.

При замене старой системы на новую существенно на некоторое время, определяемое особенностями системы, сохранять работоспособность старой системы для обеспечения непрерывности наблюдений. При этом в новой системе необходимо предусмотреть способ обработки данных, аналогичный таковому в старой системе.

### Заключение

Предложенная в работе методология составлена для специалистов широкого профиля деятельности, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией зданий и сооружений и содержит рекомендации по вопросам:

- методики организации и проведения инженерно-сейсмометрического мониторинга состояния основных несущих конструкций зданий и сооружений, при необходимости – вмещающей среды, в том числе грунтов оснований;
- методики сейсмологического мониторинга площадок размещения объекта;
- методики оценки безопасности для объектов изменений в конструкциях и вмещающей среды;

В работе содержится перечень основных схем мониторинга, различие которых определяется объемно-пространственной композицией, размерами объектов, особенно по высоте, конструктивным решением, степенью их целостности, характеристиками вмещающей геологической среды, параметрами внешних природных и техногенных воздействий.

Для ответственных инженерных сооружений схемы расстановки датчиков могут варьироваться и дополняться специализированными проектными организациями в соответствии с требованиями отраслевых нормативов.

### Литература

1. *Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения.* / Под ред. чл.-кор. РАН Юдахина Ф.Н. – М.: ИФЗ РАН. 2011. 36 с.
2. RU 2150684. *Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений* / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кузьменко А.П. и др. – № 98116428/28; Заявл. 26.08.1998. *Изобретения (Заявки и патенты).* 2000.
3. RU 2242033. *Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения.* / Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Хорев В.С., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. – № 2004103838/28; Заявл. 12.02.2004. / *Изобретения (Заявки и патенты).* 2004.

4. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. *Сейсмометрические методы прогноза ударных и вибрационных воздействий на проектируемые или реконструируемые здания.* // *Геотехнические проблемы мегаполисов.* – М.: ПИ «Геореконструкция». Т.5. 2010. С.1719-1727.

5. Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Дроздин Д.В. и др. *Сбор, обработка и хранение сейсмологической информации.* / *Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки.* 2001. С.43-61.

6. Гурвич И.И., Боганик Г.Н. *Сейсмическая разведка.* – М.: Недра. 1980. С.551.

7. Дорофеев В.М., Катренко В.Г., Назьмов Н.В. *Автоматизированная станция мониторинга технического состояния несущих конструкций высотных зданий.* / *Уникальные и специальные технологии в строительстве (UST-Build 2005).* – М.: ЦНТСМО. 2005. С.66-67.

8. Замахаев А.М. *Пространственные закономерности изменения скоростей упругих волн по данным долговременных ультразвуковых наблюдений в основании арочной плотины Ингури ГЭС.* / *Сб. Геолого-геофизические исследования в районе Ингури ГЭС.* – Тбилиси: Мицниереба. 1981. С.206-216.

9. *Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР.* – М.: 1981.

10. Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. *Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствий.* – Екатеринбург: УрО РАН: 2007. 416 с.

11. Савич А.И., Куянджич Б.Д., Коптев В.И. и др. *Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений.* Под ред. А.И. Савича и Б.Д. Куянджича. – М.: Недра. 1990. 463 с.

12. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных.* – Обнинск: ГС РАН. 2006. 162 с.

13. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. *Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий.* – Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 156 с.

14. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В. *Исследование активности платформенных территорий с использованием микросейсм.* – Екатеринбург: УрО РАН. 2008. 132 с.