

*На правах рукописи*

Базаров Артем Дамбиевич

**Разработка аппаратно-программного комплекса для контроля динамических характеристик инженерных сооружений**

Специальность

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Томск 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Геологический институт Сибирского отделения РАН» и федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Татьков Геннадий Иванович**

доктор геолого-минералогических наук  
**Суржиков Анатолий Петрович**  
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Люкшин Борис Александрович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», заведующий кафедрой механики и графики

**Гордеев Василий Фендорович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

**Ведущая организация:**

Защита состоится «9» декабря 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.269.09  
кандидат технических наук



Е.А. Васендина

## Общая характеристика работы

**Актуальность.** Диагностика и контроль технического состояния инженерных сооружений в период эксплуатации является одной из важнейших проблем строительной отрасли. Существует множество различных методов неразрушающей диагностики и контроля качества инженерных сооружений. Точечные неразрушающие методы, как правило, позволяют диагностировать только отдельные составные элементы и не дают общей интегральной оценки сооружения в целом.

Среди неразрушающих методов в последние десятилетия интенсивно развиваются вибрационные методы, которые позволяют во многих случаях получить интегральные оценки состояния и качества конструкции в целом. Методы являются нетрудоемкими и достаточно простыми в реализации. В основном интегральные оценки оцениваются путем сравнения экспериментальных значений собственных частот колебаний с расчетными характеристиками.

Обследования различных инженерных сооружений, находящихся в различных категориях технического состояниях, показало слабую частотную зависимость динамических характеристик от категории технического состояния инженерного сооружения. Поэтому, для обнаружения скрытых дефектов, вызванных ошибками монтажа или длительной эксплуатацией, требуется использование максимально возможной информации о динамике инженерных сооружений.

В связи с чем одной из актуальных проблем в данной области является поиск новых динамических критериев, обладающих высокой чувствительностью к дефектам и повреждениям инженерных сооружений, характеризующим общее техническое состояние. Что, в свою очередь, требует наличия качественного специализированного аппаратно-программного комплекса для получения достоверной информации о динамике инженерного сооружения.

**Объектом исследования** являются микросейсмические и сейсмические поля, собственные колебания инженерных конструкций, грунты основания фундаментов, разрабатываемый аппаратно-программный комплекс.

**Предметом** исследования – методы и измерительные средства оценки динамических характеристик инженерных сооружений.

**Целью** диссертационного исследования является разработка аппаратно-программного комплекса для контроля динамических характеристик системы «сооружение - грунтовое основание» и методических рекомендаций для контроля технического состояния инженерных сооружений.

### **Задачи исследования:**

- Разработать на современной электронной базе многоканальный аппаратно-программный комплекс, отвечающий высоким требованиям по надежности и функциональности, обеспечивающий регистрацию как слабых микросейсмических колебаний, так и редких сильных колебаний сооружений под воздействием землетрясений и взрывов.

- Разработать программное обеспечение, позволяющее проводить анализ полученных данных на основе различных алгоритмов по идентификации динамических характеристик.

- Выполнить анализ моделей системы «сооружение - грунтовое основание» методом конечных элементов в пакете численного моделирования «ANSYS» для

выявления динамических особенностей, связанных с изменением характеристик грунтового основания, коэффициентов и типа затухания инженерного сооружения.

- Провести экспериментальные работы по применению разработанного аппаратно-программного комплекса для мониторинга динамических характеристик различных типов инженерных систем.

**Практическая значимость.** Разработанный аппаратно-программный комплекс регистрации и обработки экспериментальных данных, а также сформированная в результате исследования база данных динамических характеристик зданий и сооружений Байкальского региона, позволяют обеспечить непрерывный контроль технического состояний инженерных сооружений.

Основная часть научного исследования по теме диссертации выполнялась в рамках региональных и федеральных программ: ФЦП «Программа социально-экономического развития Республики Бурятия» (государственный контракт № 2.21.2/6ф с Министерством экономического развития и торговли РФ по теме «Мониторинг состояния сейсмической опасности на территории Республики Бурятия»); ФЦП «Социально-экономическое развитие Республики Бурятия» (проект «Разработка методики оценки сейсмической опасности для территории Республики Бурятия»); региональная научно-техническая программа «Бурятия: Наука, Технологии, Инновации – 2002» (проект: «Разработка инновационных вибросейсмологических технологий контроля устойчивости природных систем в бассейне оз. Байкал»); государственный контракт 41–4/7г. «Геофизический мониторинг (вибросейсмический, сейсмологический, тектономагнитный) напряженного состояния очаговых зон Южного и Центрального Байкала» с Госкомитетом по природопользованию и охране окружающей среды по Республике Бурятия.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

- Разработан аппаратно-программный комплекс регистрации и обработки экспериментальных динамических данных по колебанию зданий и сооружений под воздействием микросейсмического шума и сильных землетрясений и взрывов, отличающийся от стандартной сейсмологической аппаратуры стоимостью, низким уровнем собственных шумов, высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном, позволяющим вести наблюдения в пределах от 0.1 мкм/сек<sup>2</sup> до 10 м/сек<sup>2</sup> как в оперативном режиме, так и в постоянном с удаленным управлением по любым возможным каналам связи.

- Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее проводить цифровую обработку вибрационных данных с использованием различных алгоритмов и методов по идентификации динамических характеристик исследуемых конструкций.

- Выполнен модальный анализ методом конечных элементов системы «сооружение - грунтовое основание» с целью выявления особенностей динамических характеристик системы с учетом влияния податливости основания, коэффициентов и типа затухания.

- Начато формирование региональной базы данных динамических характеристик зданий новой и старой типов застройки для дальнейшей оценки уровня сейсмобезопасности Байкальского региона.

**Практическая значимость.** Результаты диссертационного исследования апробированы при определении динамических характеристик различных типов

сооружений в городе Улан-Удэ: Бурятского театра Оперы и балета им. Г. Цыдынжапова, восемнадцатизэтажного монолитного железобетонного дома, Одигитриевского Собора, Физкультурно-спортивного комплекса Республики Бурятия; городе Иркутске: центрального Универмага, жилого двенадцатизэтажного каркасного дома, Харлампиевской церкви, Спасской церкви; городе Ангарске: дворец спорта «Ермак», ряда жилых пятиэтажных домов; в городе Улан-Батор Монгольской Народной Республики обследовано более десяти типовых представительных зданий жилой застройки.

Результаты инструментальной дефектоскопии использованы при разработке проектов и усилении жилых зданий серий 1-335, 1-306 в гг. Улан-Удэ, Иркутске, Ангарске, при доработке проекта каркасного здания серии 1.120с, восстановлении ряда памятников архитектуры, реконструкции комплекса зданий Правительства Республики Бурятия, Бурятского театра Оперы и балета им. Г. Цыдынжапова и многих других объектов. Разработанный аппаратно-программный комплекс используется для постоянного мониторинга динамических характеристик здания Геологического института СО РАН.

**Апробация работы.** Основные положения проведенных исследований по теме диссертации докладывались автором и соавторами на Казахстано-российской международной конференции «Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска» (Алматы, 2004); «V российско-монгольская конференция по астрономии и геофизике» (Иркутск-Истомино, 2004); «VI Российско-Монгольская конференция по астрономии и геофизике» (Улан-Удэ, 2005); IV, VI, X российских национальных конференциях по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) (Сочи, 2003,2005,2013); «Напряженное состояние литосферы, ее деформации и сейсмичность» (Иркутск, 2003); III всероссийской научно-практической конференции «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Красноярск, 2003). «Геология Западного Забайкалья» всероссийская молодежная научной конференция (Улан-Удэ, 2011г); «Восточно-Сибирская Региональная Конференция по вопросам сейсмобезопасности в строительстве» (Иркутск, 2011); «Геодинамика и минералогения Северо-Восточной Азии» Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию Геологического института СО РАН. (Улан-Удэ, 2013г)

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в двадцати работах, в том числе восемь работ в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 115 источников. Работа содержит 134 страниц машинописного текста, 68 рисунков, 21 таблицу.

**Личный вклад.** Автором лично разработан аппаратно-программный комплекс с применением микропроцессорных компонентов для исследования динамических характеристик инженерных сооружений, реализовано программное обеспечение для обработки вибрационных данных с использованием различных методов цифровой обработки сигналов, проведен анализ цифровых моделей для сравнения с экспериментальными данными. Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях, являясь основным исполнителем исследовательских работ.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- Аппаратно-измерительный комплекс регистрации и обработки динамических колебаний зданий и сооружений под действием микросейсмического шума, сильных землетрясений и взрывов.
- Результаты исследования влияния технического состояния инженерных сооружений на динамические характеристики.
- Методические рекомендации для мониторинга динамических характеристик инженерных сооружений.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю – д.г.-м.н. Геннадию Ивановичу Татькову – одному из основоположников применения микродинамического метода для решения задач, связанных с диагностированием технического состояния инженерных сооружений на территории Байкальского региона, за руководство, постоянную поддержку и внимание к работе.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрены и проанализированы современные методы и методики по идентификации динамических характеристик инженерных сооружений с использованием вибрационных методов слабого воздействия. В основном вибрационные методы основаны на следующих видах анализа:

- корреляционный анализ – применяется для стационарных систем, подверженных случайным воздействиям. Оценивается корреляционная функция отклика между сигналами на входе и выходе системы.

- частотный анализ – наиболее часто применяемый анализ для выделения собственных частот при случайном воздействии на инженерное сооружение. При воздействии на систему внешнего гармонического сигнала возможна неверная идентификация динамических параметров.

- передаточный анализ – наиболее полно описывает поведение динамической системы, подверженной как случайному, так гармоническому воздействию.

В данной главе рассматривается идентификация динамических характеристик инженерных сооружений с использованием анализа передаточной функции. Инженерное сооружение представляется как линейная система, на вход которой подан микросейсмический шум. В этом случае передаточная функция для механической системы оцениваются по формуле.

$$K(\omega) = \frac{\sum_{I=1}^N CT_I^*(\omega) \cdot CO_I(\omega)}{\sum_{I=1}^N |CO_I(\omega)|^2}$$

$CT_I(\omega)$  - частотный спектр в точке наблюдения

$CO_I(\omega)$  - частотный спектр в опорной точке

Полученная комплексная передаточная функция описывает все основные динамические характеристики, такие как фазовая задержка между сигналами на входе системы и точкой наблюдения, усиление амплитуды колебаний, собственные частоты колебаний, коэффициент демпфирования системы.

**Во второй главе** описывается структура разработанного аппаратно-программного комплекса регистрации, хранения и обработки данных динамических колебаний инженерных сооружений.

Аппаратно-программный комплекс (АПК) состоит из измерительной системы динамических колебаний и программного пакета обработки данных исследования. Разработанный АПК позволяет проводить исследования инженерных сооружений в широком динамическом диапазоне, под воздействием как микросейсмических колебаний, так и 9-ти балльных сейсмических событий.

Условная схема разработанного АПК приведена на рисунке 1. Для подключения датчиков выбрана проводная схема, данный способ существенно уменьшает себестоимость комплекса, более надежен и функционален. Позволяет подключать до 8 датчиков со 100-метровыми соединительными проводами. Основные части аппаратного комплекса:

1. Первичные преобразователи (пьезодатчики).
2. Аналоговая часть (усилители, фильтры, АЦП).
3. Цифровая часть (коммутатор и АЦП).
4. Промышленный встраиваемый компьютер.
5. ЭВМ ПК с программный обеспечением.

Для выбора первичных преобразователей выполнен анализ существующих типов вибропреобразователей. По результатам проведенного анализа наиболее подходящим и удобным в использовании считается пьезоакселерометр - измерительный сенсор, основанный на преобразовании деформации пьезокристалла под действием инерционной массы в электрический сигнал. Технические характеристики пьезоакселерометра подобраны с учетом анализа многолетних сейсмических данных для различных городов: Улан-Удэ, Иркутска и Улан-Батора. На основе данных амплитуд микросейсмических колебаний и максимального значения ускорения 9-ти балльного землетрясения Байкальского региона определены параметры чувствительности пьезоакселерометров и регистрирующей аппаратуры. Рабочий частотный диапазон согласно ГОСТ 30546.2-98 выбран в диапазоне (0.1-30) Гц.

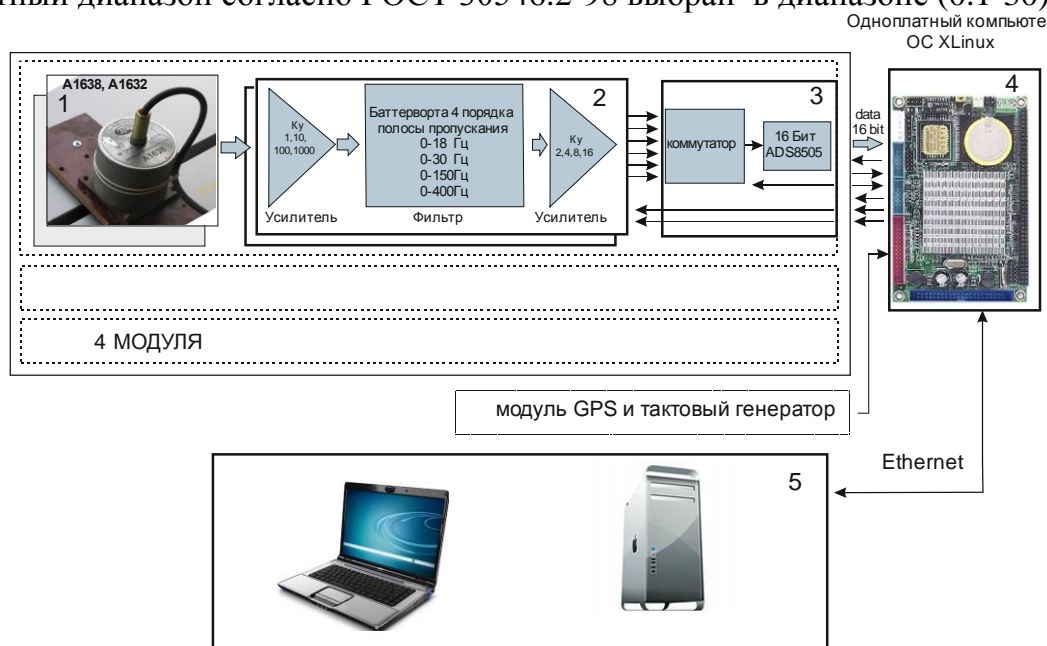


Рисунок 1. Условная схема аппаратно-программного комплекса «Иркут»

Аппаратно-программный комплекс предназначен для работы в промышленных и жилых сооружениях при низких уровнях собственных колебаний и при наличии различных помех и шумов. В связи с чем, для качественной регистрации сигнала выбрана аналоговая схема фильтров и усилителей. В качестве предусилителя применен операционный усилитель PGA 204 с программным управлением коэффициента усиления (1, 10, 100, 1000 раз). Аналоговый фильтр 4-го порядка реализован на микросхеме активного фильтра UAF42.

Цифровая часть включает в себя 16-ти битный аналого-цифровой преобразователь ADS8505 с параллельным интерфейсом, микроконтроллер управления PIC32MX795 и встраиваемый промышленный компьютер на процессоре Vortex86SX под управлением операционной системой X-LINUX. Данное аппаратное решение обеспечивает высокую функциональность и надежность комплекса. Предоставляет возможность использования АПК как для кратковременных оперативных исследований, так и для задач постоянного мониторинга инженерных сооружений с использованием любых каналов связи для удаленного контроля и управления аппаратно-программным комплексом.

Программа регистрации и управления параметрами разработанного аппаратно-программного комплекса состоит из функциональных программных модулей, осуществляющих чтение данных с аналого-цифровых преобразователей, управление коммутаторами и параметрами аналоговой частью комплекса, сохранение данных в виде файлов сеансов наблюдения и передачу данных на ЭВМ ПК. Реализована на языке программирования С и состоит из двух модулей – «Gnom-mod», «Gnom-reg».

«Gnom-mod» - модуль ядра ОС Linux. Обеспечивает взаимодействие между аппаратной частью и пользовательской программой регистрации комплекса. «Gnom-reg» - пользовательская программа, обеспечивает чтение конфигурационных файлов настройки комплекса и передачу параметров модулю «Gnom-mod» для установки необходимой конфигурации системы. После настройки аппаратной части комплекса программа «Gnom-reg» выполняет чтение поканальных отсчетов и сохранение их в виде файлов на карте памяти. В конфигурационном файле отображаются все данные о параметрах датчиков: номер датчика, порядковый номер, коэффициент преобразования, координаты места установки датчика(X,Y,Z). Параллельно с записью данных на карту памяти, программа «Gnom-reg» выполняет передачу полученных данных по сети Ethernet на ЭВМ ПК с помощью FTP протокола для визуального оперативного контроля качества получаемого материала. Сетевые возможности программы «Gnom-reg» реализованы с помощью скриптового языка программирования «LUA».

Для обработки вибрационных данных разработано и реализовано программное обеспечение BuildMod (рисунок 2). Данное программное обеспечение позволяет анализировать полученные вибрационные данные для определения динамических характеристик исследуемой системы (собственные частоты, демпфирование, динамическое усиление, передаточные функции) и статистическую обработку данных

**В третьей главе** проведено сравнение экспериментальных и расчетных данных, выполненных методом конечных элементов в пакете физического моделирования «ANSYS». Данный программный пакет позволяет выполнить прочностной и динамический анализ с учетом статистического и динамического воздействия, вычислить значения собственных частот, реакцию сооружения на случайное и гармоническое воздействие, провести анализ переходных процессов.



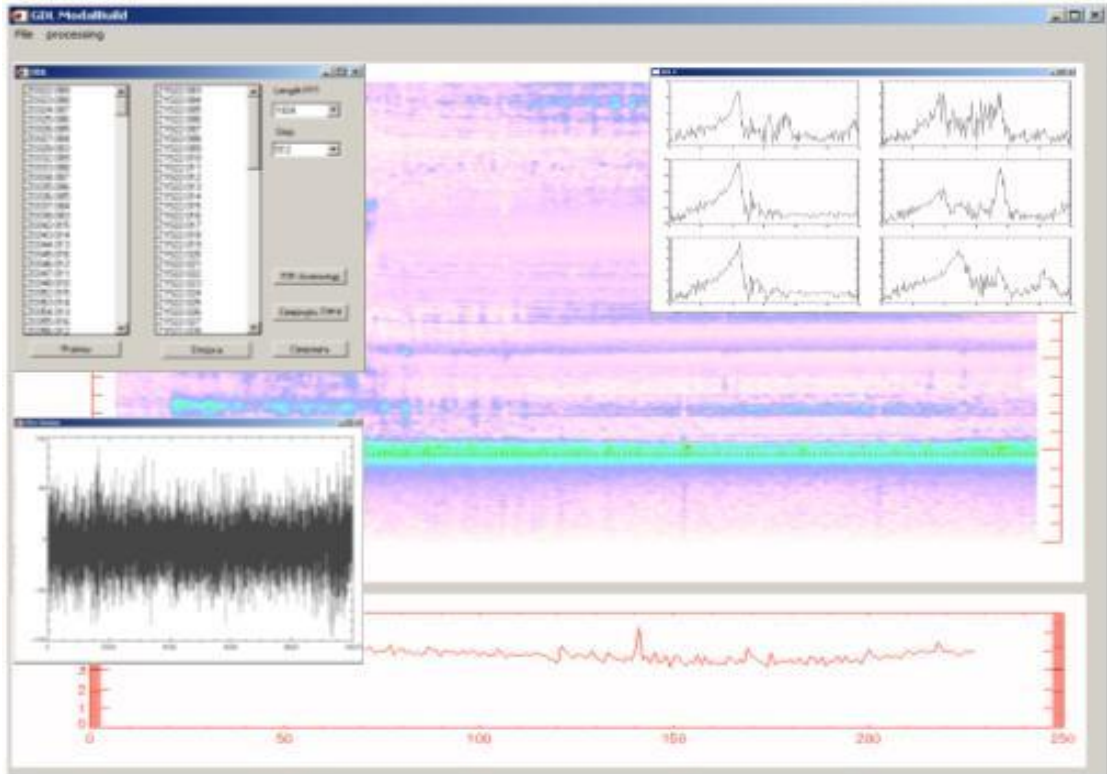


Рисунок 2. Интерфейс программы обработки вибрационных данных BuildMod

В главе исследованы вопросы влияния жесткости основания на собственные частоты системы «сооружение - грунтовое основание». Грунтовое основание моделировалось набором элементов типа «пружина» жесткостью  $K$  и затуханием  $C$ . Оценочные параметры жесткости и затухания модели грунтового основания можно вычислить формулам (таблица 1).

Таблица 1 – Свойства грунтового основания, основанные на простой физической модели

Направление	Жесткость пружины	Демпфирование	Добавленная масса
вертикальное	$\frac{4Gr}{1-\nu}$	$\rho 2\nu A$	$2.4 \left( \nu - \frac{1}{3} \right) \rho A r$
горизонтальное	$\frac{8Gr}{2-\nu}$	$\rho \nu A$	-
качения	$\frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$	$\rho 2\nu I$	$1.2 \left( \nu - \frac{1}{3} \right) \rho I r$

Выполненные расчеты на балочной модели здания с учетом конечной жесткости грунтового основания показали сильную зависимость значения собственных частот от категории грунтового основания. Рассмотрены модельные случаи с защемленным основанием и основаниями I-III категории грунтов (таблица 2). В расчетном спектре колебаний для модели с защемленным основанием присутствуют две поступательные, четыре вращательные и четыре изгибные формы собственных колебаний. Колебания по оси  $Z$  не выделяются. Данный спектр можно принять за исходное состояние системы «инженерное сооружение – грунтовое основание». Для примера показано, что для грунтового основания III категории частота поступательных колебаний снижается на

62% для поперечного направления и на 50% для продольного направления. Частота вертикальных колебаний снизилась до 6.8 Гц. Частоты 11.4 и 13.0 Гц практически не изменились.

Таблица 2 – Частоты собственных колебаний в зависимости от параметров грунтового основания.

№	Модель с заземленным основанием			Модель с грунтовым основанием III категории			
	X, Гц	Y, Гц	Z, Гц	X, Гц	Y, Гц	Z, Гц	
1	-	3.6	-	-	1.4	-	Поступательная
2	4.1	-	-	2.0	-	-	Поступательная
3	4.8	4.8	-	4.7	4.7	-	Вращательная
4	-	11.7	-	-	-	6.8	Изгибная
5	13.3	-	-	-	11.4	-	Изгибная
6	15.2	15.2	-	13.0	-	13.0	Вращательная
7	18.0	18.0	-	14.5	-	14.5	Вращательная
8	-	20.1	-	15.2	15.2	-	Изгибная
9	-	21.2	-	-	16.7	16.7	Изгибная
10	23.1	23.1	-	17.4	17.4	-	Вращательная

В данной главе на основе численных методов доказано сильное влияние жесткости грунтового основания на собственные частоты инженерных сооружений. Показано, что основным признаком ослабленного грунтового основания является выделение вертикальных низкочастотных колебаний. Данный результат подтвержден экспериментальными работами при обследовании здания школы №49 г. Улан-Удэ.

Параллельно с исследованием зависимости собственных частот от жесткости грунтового основания в главе рассмотрено влияние коэффициентов затухания на динамические характеристики инженерных сооружений.

Для динамических систем общее демпфирование можно представить в виде

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \sum_{j=1}^{nmat} \beta_j[K_j] + [C_\vartheta] + \sum_{k=1}^{nel} [C_k]$$

где  $\alpha[M]$  – инерционное демпфирование;

$\beta[K] + \sum_{j=1}^{nmat} \beta_j[K_j]$  – конструкционное демпфирование;

$[C_\vartheta]$  – постоянное демпфирование;

$\sum_{k=1}^{nel} [C_k]$  – элементы с трением;

$[C_k]$  – матрица сопротивления отдельного элемента;

На практике демпфирование упрощается до комбинации вкладов двух сопротивлений, связанных с матрицами системы - матрицей масс и матрицей жесткости:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K],$$

коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  известны как константы демпфирования Рэлея. Их значения обычно не известны, т.к. большинство данных, касающихся демпфирования, доступно в

виде частотных коэффициентов затухания  $\xi_i$ , т.е. в виде отношения фактического значения затухания к критическому для определенного режима колебаний. Следовательно, при данном значении  $\alpha$ -демпфирования коэффициент демпфирования обратно пропорционален частоте. Таким образом, низшие частоты будут демпфироваться сильнее, а верхние - меньше.

Для оценки влияния параметров затухания на поведение системы был выполнен анализ реакции цифровой модели на силовое воздействие в виде «белого шума» с применением модуля «RANDOM ANALYSIS» пакета физического моделирования «ANSYS».

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы (таблица 3, рисунок 3):

Таблица 3 – Модельные значения параметров затухания

Тип затухания	Значение 1	Значение 2
Общее затухание	0.05	0.05
Beta затухание	0.0005	0.005

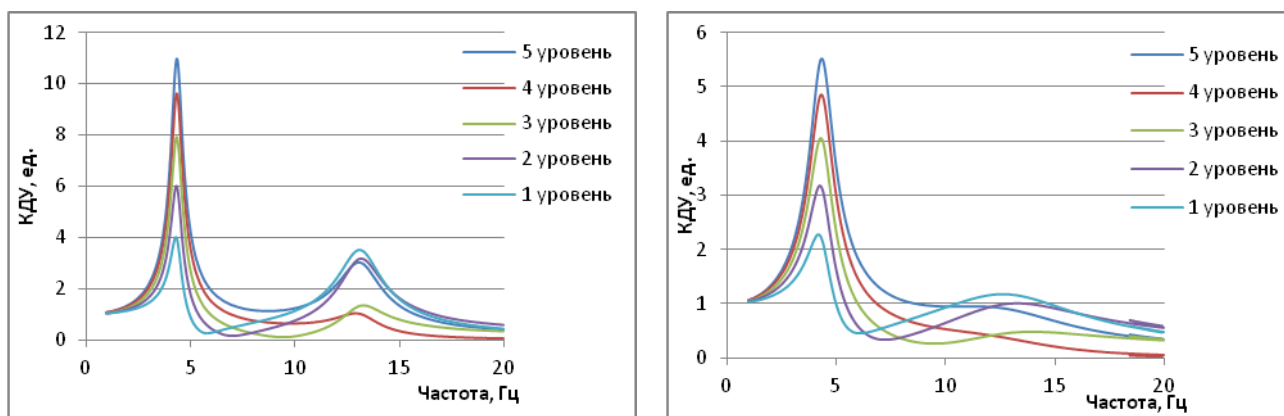


Рисунок 3- Спектры реакции модели на воздействие «белого» шума при различных комбинациях параметров затухания, для значений 1 и 2

1. Увеличение общего коэффициента затухания приводит к уменьшению отношения поэтажных спектров ускорения к спектру основания, или так называемого коэффициента динамического усиления (КДУ). Данный результат хорошо совпадает с экспериментальными наблюдениями.

2. Увеличение конструкционного демпфирования также выражается в уменьшении величины КДУ, при этом следует отметить сильное ослабление второй и высших мод.

В главе выполнено сравнение теоретического материала с экспериментально полученными динамическими характеристиками различных инженерных сооружений, находящихся в различном техническом состоянии.

### Категория «ограниченно-работоспособное состояние»

г. Улан-Батор, д. №65 мкр. №15

Здание серии I-464-A-C, дом №65 в микрорайоне 15 г. Улан-Батор. Здания постройки начала 70-х годов прошлого века. Конструктивная схема жилого дома - перекрестно-стеновая система несущих поперечных и продольных стен. Шаг

поперечных стен порядка 3.0 м. Визуальный осмотр лестничной клетки показал идентичность конструктивных решений площадок лестничных маршей, усиленных ребрами жесткости, с конструкциями панельной серии I-464-А-С. На лестничных площадках видна коррозия арматуры ригелей.

Таблица 4 – Значения параметров затухания для здания №65 мкр. №15 г. Улан-Батор

Alfa затухание	Beta затухание
0.005	0.000096

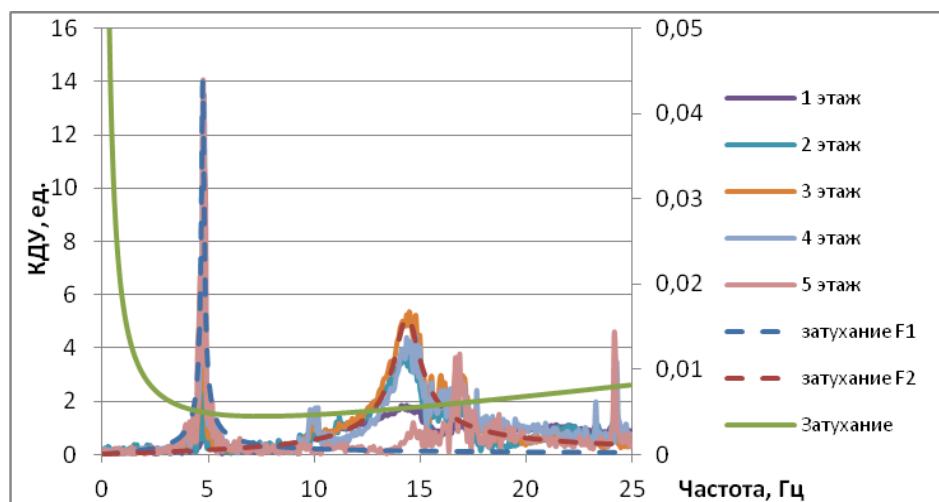


Рисунок 4- Спектры поперечных колебаний здания №65 мкр. №15 г. Улан-Батор

Для здания отмечается очень низкое значение коэффициента затухания (таблица 4), в следствие чего наблюдается большое значение коэффициента динамического усиления (рисунок 4), КДУ=14. Также выделяется большой амплитудой вторая изгибная форма. Для данного здания конструктивное затухание (beta) имеет низкое значение, практически равное нулю. Все это свидетельствует об неудовлетворительном техническом состоянии дома №65

#### г. Улан-Удэ, ул. Гагарина, д. №36

Здание серии I-306с. Жилое 4-х этажное кирпичное здание. Было введено в эксплуатацию в декабре 1960 г. Высота здания 12.57 м. В подвале существовала котельная со всеми технологическими и вспомогательными помещениями. Фундаменты здания выполнены из рваного бута на цементно-известняковом растворе. Стены кирпичные, оштукатуренные. Несущими являются продольные стены. Перекрытия из ж/б ребристых плит. Летом 1997 г. после образования сквозных трещин, вследствие просадки грунта были проведены ремонтно-восстановительные работы.

Таблица 5 – Значения параметров затухания для здания ул. Гагарина №3 г. Улан-Удэ

Alfa затухание	Beta затухание
0.015	0.00031

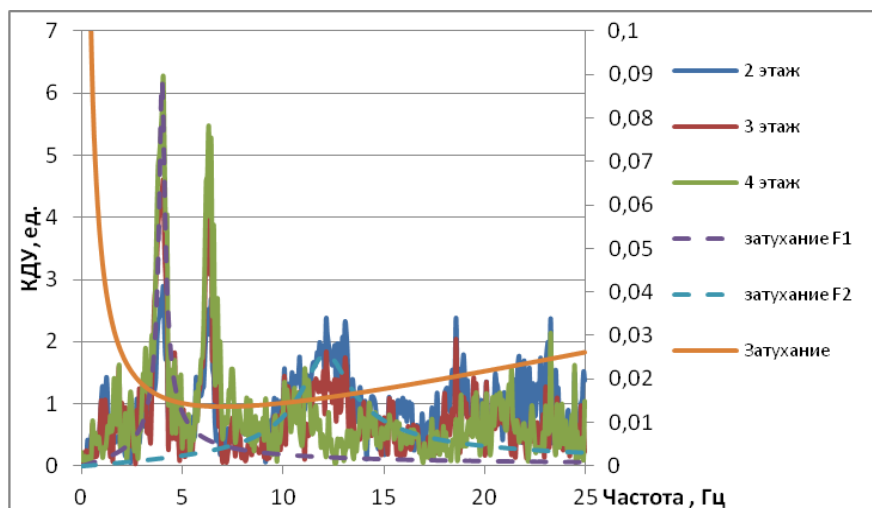


Рисунок 5 - Спектры поперечных колебаний здания ул. Гагарина №3 г. Улан-Удэ

Здание характеризуется низким значением коэффициента затухания (таблица 5). Для 4-х этажного здания существенное значение динамического усиления  $KDU=6$  (рисунок 5). Наряду с первой формой колебания выделяется колебания на частоте 6.3 Гц, которое может является частотой колебания отдельного блока здания.

### Категория «работоспособное техническое состояние»

#### ул. Солнечная №90 г. Улан-Удэ

Также исследовано сооружение, находящееся в удовлетворительном техническом состоянии. В данном случае, 5-ти этажное здание серии 92-08С имеет нормальные значения коэффициента затухания (таблица 6) и амплитуду КДУ (рисунок 6).

Таблица 6 – Значения параметров затухания для здания ул. Солнечная №90 г. Улан-Удэ

Alfa затухание	Beta затухание
0.053	0.0011

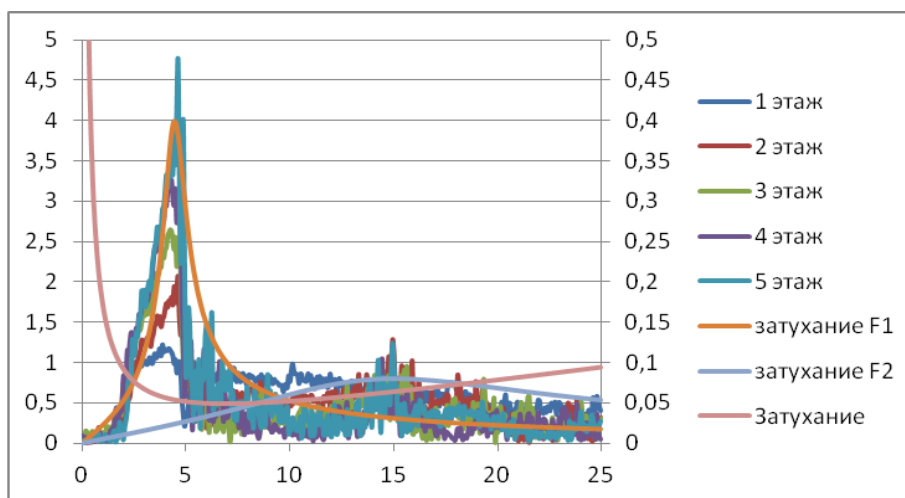


Рисунок 6 – Спектры поперечных колебаний здания ул. Солнечная №90 г. Улан-Удэ

Параллельно с изучением точечных динамических характеристик, таких как частоты, формы колебаний и декременты затухания, аппаратно-программный комплекс



позволяет исследовать скорости и волновые карты распространения изгибных сейсмических волн в объеме здания, что намного повышает информативность исследований. В работе показано практическое применение комплекса при мониторинге динамических характеристик, проводимых при вибрационном испытании блок-секции 9-этажного здания серии 1-120 в г. Иркутске. Особенностью данной серии является сборные колонны со «штепсельными» межэтажными стыками. Так, для исследуемого сооружения в продольном направлении на первоначальном этапе и после вибрационной 9-ти балльной нагрузки скорость распространения изгибных волн в объеме здания не изменилась и примерно равна 350 м/с, имеет равномерный характер без видимых зон отражений волн (рисунок 7 А, Б).

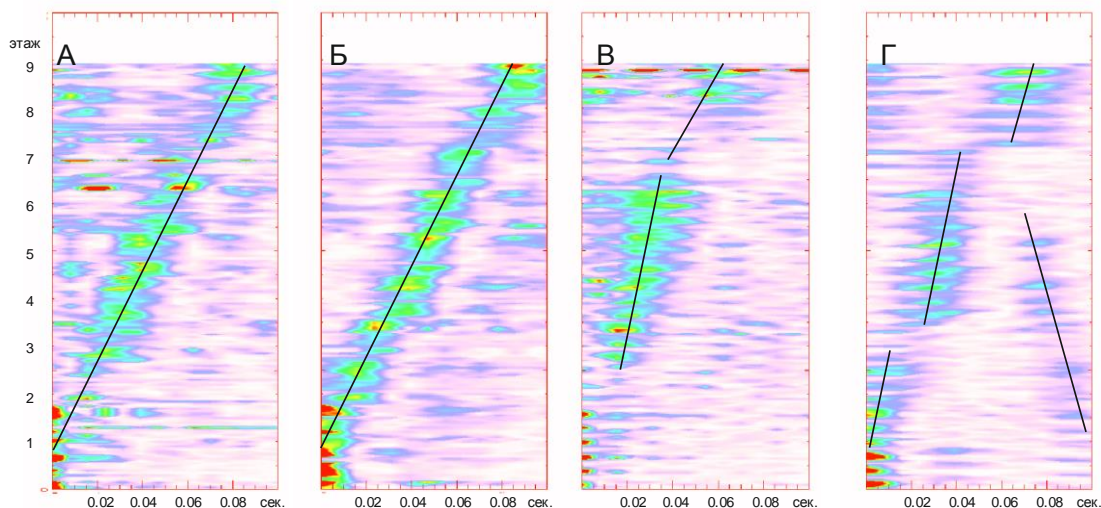


Рисунок 7. Распространение волнового пакета по продольному (А- до, Б – после вибрационных испытаний) и поперечному (В - до, Г – после вибрационных испытаний) направлениям 9-этажного каркасного здания серии 1-120с.

Для поперечного направления картина совсем другая. Карта распространения изгибных волн носит сложный, неоднородный характер. На первоначальном этапе выделяются две зоны с различными скоростями (рисунок 7В): первая зона с 1 по 6 этаж имеет скорость волны порядка 500 м/с; вторая зона с 7 по 9 этаж - 350 м/с. После цикла вибрационной нагрузки на вертикальном годографе четко выделяются три зоны по высоте с резкими границами по вертикали и различающихся скоростями. В средней зоне блок секции на границе 6 и 7 этажей появились отражения волн и участки пониженной когерентности. Выявленные границы зон с различными скоростными характеристиками и искажениями эпюр колебаний соответствуют местам соединений колонн «штепсельного» типа с нарушенной технологией сборки стыка (рисунок 8). Дальнейшее вскрытие дефектных узлов выявило отсутствие бетонного раствора в полостях соединительных стыков колонн (в 5-ти из 18-ти узлов), что полностью подтверждает результаты микросейсмических наблюдений.

**В четвертой главе** рассмотрено практическое применение разработанного аппаратно-программного комплекса «Иркут» для мониторинга динамических характеристик различных инженерных сооружений при выполнении строительных работ и постоянном режиме работы.

В главе приведен пример постоянного мониторинга динамических характеристик на примере здания Геологического института СО РАН. На сооружении установлен разработанный АПК с четырьмя акселерометра А1632, позволяющий фиксировать

внешние воздействия в широком динамическом диапазоне от  $1 \text{ мкм/с}^2$  до  $10 \text{ м/с}^2$ . Для регистрации метеоусловий на здании установлена метеостанция.

В качестве опорной характеристики выбрана передаточная функция между датчиками расположенными на 3 уровне и датчиком на 1 уровне.

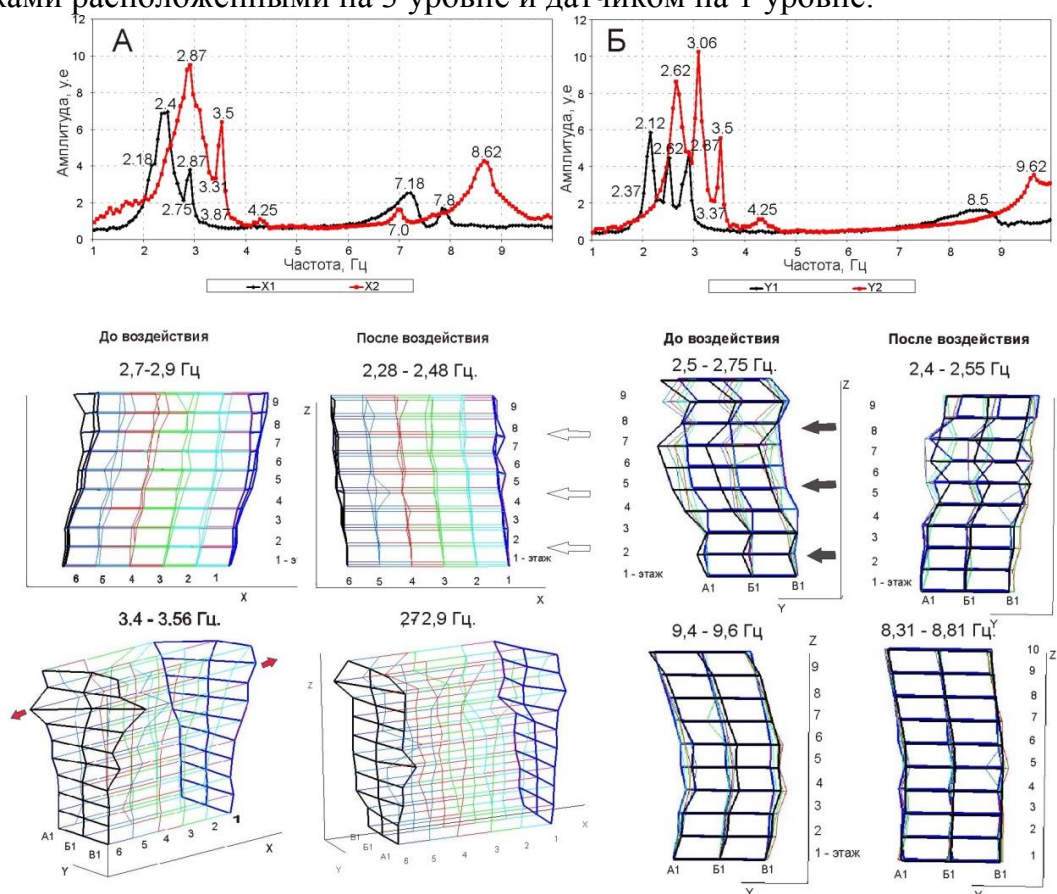


Рисунок 8. Амплитудно-частотные характеристики (А – по продольному, Б – по поперечному направлениям) и основные модальные формы до и после вибрационных испытаний 9-этажной блок-секции №3 серии 1.120с. Стрелками показано положение стыков «штепсельного» типа.

На рисунке 9 показаны суточные развертки спектров передаточной функции и график изменения скорости ветра. Амплитуда первой собственной частоты не коррелирует с амплитудой скорости ветра, зафиксированной метеостанцией. При усилении ветра наблюдается только увеличение высокочастотных составляющих спектра, что связано с помехами от дребезжания металлической крыши. Некоррелируемость ветровой нагрузки и амплитуды передаточной функции еще раз свидетельствует о линейных жесткостных свойствах сооружения и постоянстве передаточных характеристик.

Параллельно с задачей непрерывного мониторинга динамических характеристик актуально стоит задача регистрации реакции сооружения на сильные сейсмические события. Такие записи имеют большое научное значение для понимания процесса динамики сооружения при воздействии землетрясения. Позволяют учитывать региональные особенности землетрясений для эффективного и безопасного проектирования новых видов зданий и сооружений.

В главе исследовано влияние внешнего воздействия на сооружение. В качестве силового воздействия рассмотрено землетрясение 11 класса с эпицентром в районе с.

Листвянка. Максимальная амплитуда ускорения землетрясения, зафиксированная у основания сооружения, имеет амплитуды  $0.01 \text{ м/с}^2$ . Данное землетрясение неклассифицируется и не ощущалось людьми. Длительность воздействия S компоненты порядка 10 сек. Согласно проведенному вейвлет анализу зафиксированных колебаний у основания и на покрытии сооружения, частотный состав вызванных колебаний сильно различается. Так, у основания спектр колебания довольно широк (от 1 до 10 Гц), спектр же на покрытии сужен и локализован в районе 4.6 Гц в области первой собственной частоты колебания сооружения.

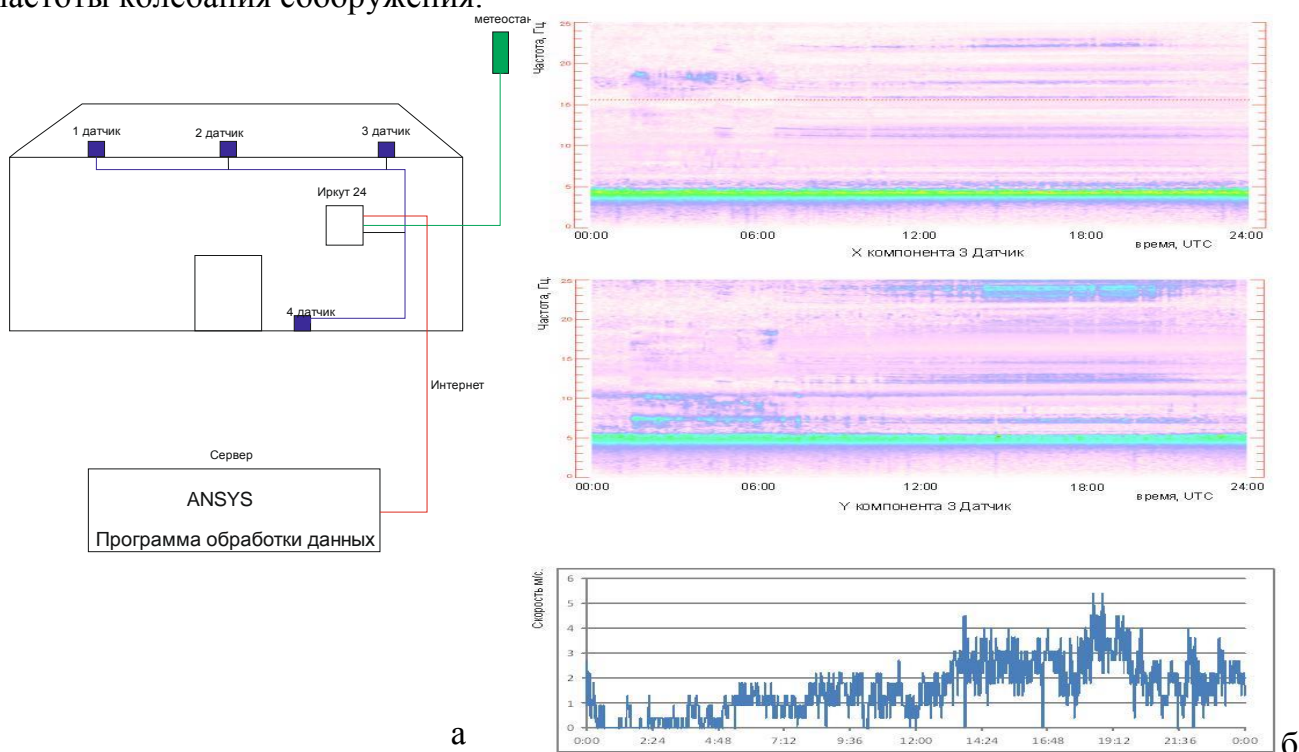


Рисунок 9 - Условная схема постоянного мониторинга технического состояния здания Геологического института СО РАН (а) Суточные спектрограммы передаточных функций и график скорости ветра (б)

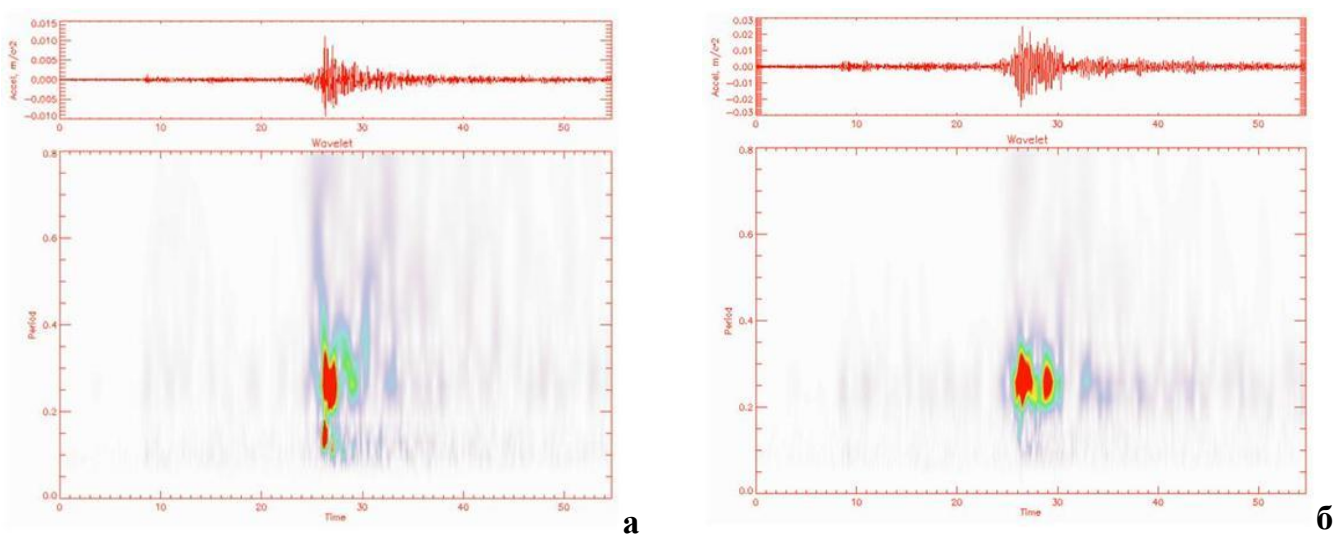


Рисунок 10 - Акселерограммы и вейвлетграммы землетрясения зарегистрированного у основания (а) и на покрытии сооружения (б)



Для оценки динамических усилений и колебаний, вызванных воздействием землетрясения, в работе выполнено сравнение частотных составляющих акселерограммы, полученных с помощью частотного вейвлет разложения. На рисунке 11 представлены компоненты записей землетрясения на частотах 1.6, 4.6, 8, 15 Гц для датчиков, установленных у основания (зеленый цвет) и на покрытии сооружения (красный цвет). При таком представлении землетрясения на компоненте 4.6 Гц отчетливо выделяются резонансные колебания, связанные с совпадением собственных частот сооружения с частотами землетрясения.

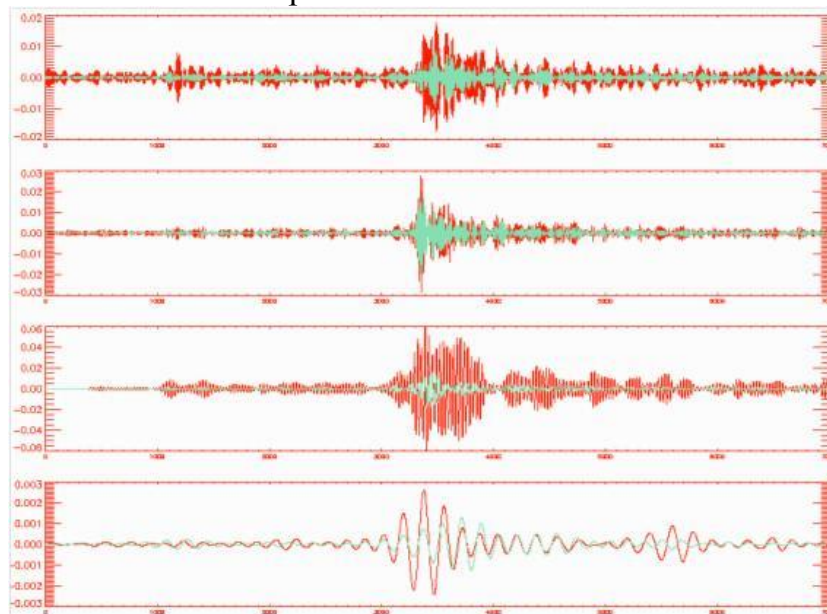


Рисунок 11 - Выборочные акселерограммы на частотах 1.6, 4.6, 8, 15 Гц

Дальнейший анализ данных показал аналогичность коэффициента динамического усиления, полученного на основе передаточной функции при воздействии микросейсмического шума, с результатами обработки реакции сооружения, вызванного воздействием сейсмического события с помощью вейвлет анализа (рисунок 12).

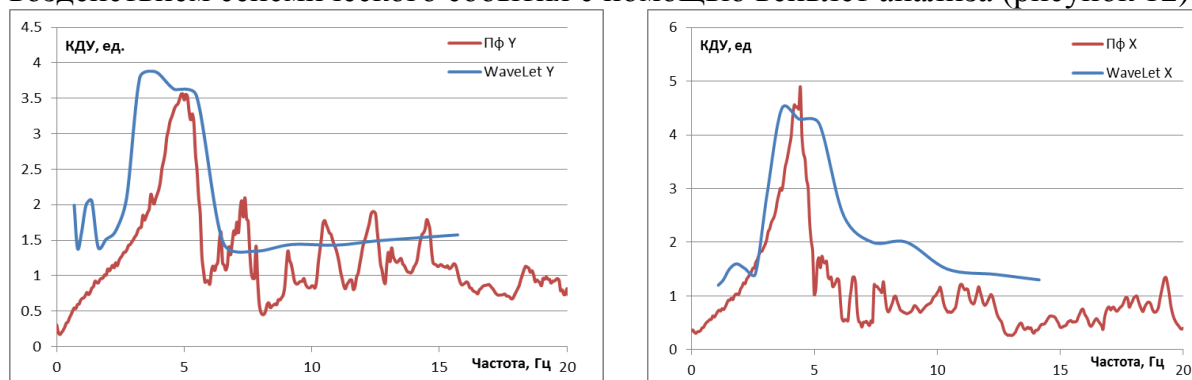


Рисунок 12 - Сравнение отношения вейвлетграм для продольного и поперечного направлений со спектрами передаточных функций.

### Периодический мониторинг динамических характеристик инженерных сооружений

В работе представлены результаты применения разработанного аппаратно-программного комплекса для периодического контроля динамических характеристик

инженерного сооружения в ходе выполнения строительных работ. Работа была выполнена в процессе ввода в эксплуатацию физкультурно-спортивного комплекса (ФСК) г. Улан-Удэ.

При проведении инженерно-технического осмотра ферменных конструкций сооружения были выявлены многочисленные сборочные дефекты в металлоконструкциях:

- Зазор в местах сопряжения элементов доходили до 1 см;
- Отсутствуют пружинные шайбы, сборка велась без граверов;
- Подрез фасонки у фермы;
- Несоосность отверстий;
- Крепление узла на 2-х болтах вместо 4-х болтов из-за несоосности;

Геологическим институтом СО РАН, согласно требованиям Федерального закона от 30.12.2009 №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», был проведен контроль динамических характеристик физкультурно-спортивного комплекса в ходе выполнения ремонтно-строительных работ.

Обследование комплекса проводилось микродинамическим (модальным) методом в 3 этапа.

- Первый этап – исходное состояние, определение исходных динамических характеристик комплекса со всеми дефектами;
- Второй этап – после протяжки болтовых соединений;
- Третий этап – после выполнения всех работ, установки гравёров, затяжки болтовых соединений и выполнения сварочных работ.

В результате обследования получены пространственные формы колебания ферменного покрытия спорткомплекса для I исходного состояния и после II и III этапов строительных работ.

Проведенные исследования показали положительную динамику улучшения пространственной целостности ферменной конструкции. Согласно первоначальным исследованиям, покрытие не представляло собой единого целого, выделяются отдельные локальные максимумы с повышенной амплитудой колебания, свидетельствующие об отсутствии жестких связей между различными элементами покрытия.

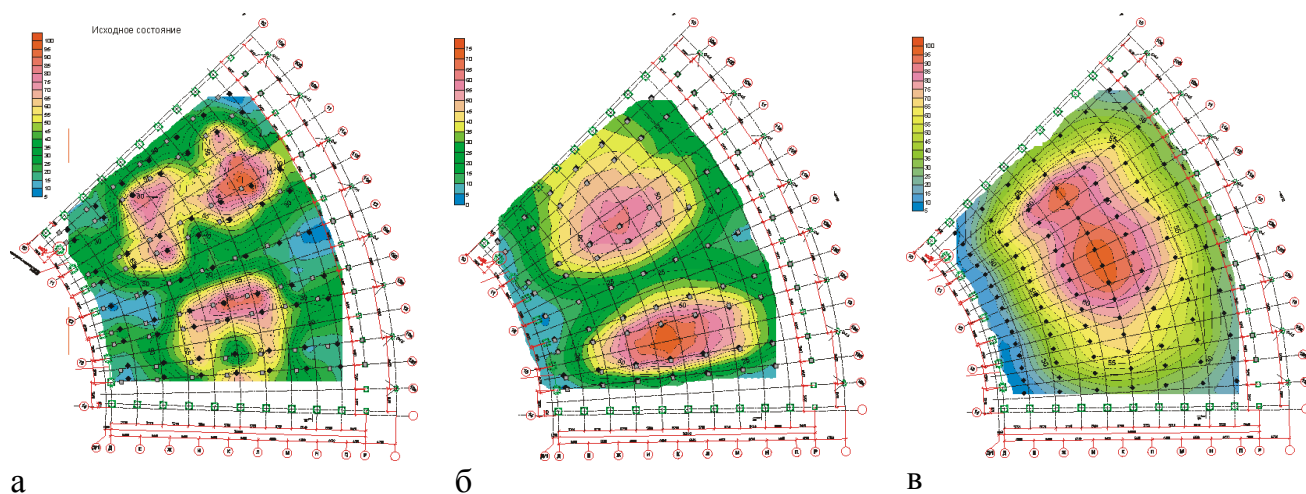


Рисунок 13. Динамика изменения амплитуд усиления вертикальных колебаний на частоте 1.9 Гц для I(а), II(б) и III(в) этапов мониторинга

Следующий этап исследования, проведенный после протяжки болтовых соединений, показал значительное улучшение целостности ферменных конструкций. В динамике покрытия выделяются устойчивые собственные формы, которые можно сопоставить с расчетными формами колебания.

На конечном этапе после проведения всего ряда ремонтных работ динамическая картина стала соответствовать колебаниям мембраны и расчетным значениям собственных частот. Данное распределение амплитуд и частот можно взять за начальное состояние для дальнейшего мониторинга динамических характеристик ферменного покрытия спортивного комплекса.

### **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ**

В диссертационной работе продолжены работы по развитию вибрационных методов исследования динамических характеристик инженерных сооружений. Показано практическое применение разработанного аппаратно-программного комплекса для задач постоянного и периодического мониторинга динамических характеристик. Кроме того, в работе получены новые научные и практические результаты, основными из которых являются:

1. Разработан многоканальный аппаратно-программный комплекс регистрации и обработки экспериментальных вибрационных данных, позволяющий проводить контроль технического состояния инженерных сооружений на основе вибрационных методов.
2. Разработано специализированное программное обеспечение с использованием библиотеки GDL, позволяющее проводить цифровую обработку вибрационных данных с использованием различных алгоритмов и методов по идентификации динамических характеристик исследуемых сооружений.
3. С использованием пакета физического моделирования ANSYS изучены особенности поведения цифровых моделей инженерных сооружений в зависимости от модельных параметров грунтового основания и зависимости динамических характеристик от параметров демпфирования.
4. Численным методом выявлено и экспериментально доказано, что основным показателем ослабленного грунтового основания является проявление в спектре общеконструкционных низкочастотных колебаний.
5. На основе натурных обследований микродинамическим и инженерно-техническим методами основных зданий представителей массовой застройки в гг. Улан-Удэ, Улан-Батор определены динамические характеристики, характеризующие техническое состояние инженерных сооружений.
6. Впервые экспериментально исследованы пространственные динамические характеристики большепролетного ферменного сооружения. Доказана возможность применения микродинамического метода для контроля технического состояния большепролетных ферменных конструкций.

### **Основные работы по теме диссертационного исследования.**

#### **Статьи в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:**

1. Базаров А.Д. Разработка аппаратно-программного комплекса для контроля динамических характеристик инженерных сооружений / А.Д. Базаров, А.П. Суржигов // Контроль. Диагностика. – 2014. - №11
2. Базаров А.Д. Оценка сейсмической надежности современной застройки г. Улаанбаатора / Л.П. Бержинская, О.И. Саландаева С., А.Д. Базаров, Дэмбэрэл, Д.В. Киселев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2014. - № 1. - С. 49-55.
3. Базаров А.Д. Мониторинг технического состояния большепролетного покрытия физкультурно-спортивного комплекса в ходе строительных работ / А.Д. Базаров, В.Г. Баранников, Г.И. Татьков // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2013. - № 2. - С. 51-56.
4. Базаров А.Д. Оценка информативности микродинамических измерений при натуральных испытаниях безригельного каркаса серии 1. 120с / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, Ю.А. Бержинский // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2010. - № 1. - С. 21-27.
5. Базаров А.Д. Инструментальная и расчетно-аналитическая оценка сейсмостойкости панельных жилых домов серии 1-335 / М.П. Калашников, В.Г. Баранников, Г.И. Татьков, А.Д. Базаров // Вестник ВСГУТУ. - 2012. - №1(36). - С. 189 - 192.
6. Базаров А.Д. Сейсмическая надежность жилой застройки г. Улаанбаатора / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, Л.П. Бержинская, С Демберел // Вестник ВСГУТУ - 2012. - №1(36).- С. 223 -228.
7. Базаров А.Д. Микродинамические исследования высотного здания из монолитного железобетона / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, В.Г. Баранников // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2006. – № 6. – С. 27–31.
8. Базаров А.Д. Вибросейсмические исследования литосферы Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров, В.В. Толочко, В.В. Ковалевский, Л.П. Брагинская, А.П. Григорюк // Отечественная геология. - 2013.-№ 3.- С. 16–23.
9. Базаров А.Д. Эксперименты по вибросейсмической интерферометрии на Байкальском геодинамическом полигоне / Г.И. Татьков, В.В. Ковалевский, А.Д. Базаров, Ц.А. Тубанов, В.В. Толочко // Отечественная геология. – 2008. – № 3. – С. 94–97.

#### **Авторские свидетельства:**

10. BuildMod- программа для анализа динамических характеристик инженерных сооружений: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ 2014619571, Рос. Федерация. заявка №2014614214 / Базаров А.Д.; правообладатель ГИН СО РАН; дата поступления: 05.05.2014; дата регистрации: 18.09.2014.

#### **Материалы конференций:**

11. Базаров А.Д. Мониторинг строительства большепролетных покрытий физкультурно-спортивного комплекса г. Улан-Удэ / А.Д. Базаров, Г.И. Татьков, В.Г. Баранников, В.И. Джурик // Материалы X Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием. Сочи - 2013. - С 67-68.
12. Базаров А.Д. Микросейсмические измерения динамических характеристик зданий-

представителей жилой застройки г. Улан-Батора / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, Ю.А. Бержинский, Л.П. Бержинская, Д.В. Киселев, С. Дэмбэрэл, Т. Эрдэнэтуяа, Д. Тулга // Сотрудничество СО РАН с Академией наук Монголии в рамках реализации совместных проектов: итоги и перспективы. Материалы научно практической конференции. Иркутск, 2012 г. – Иркутск: Изд-во ИНЦ СО РАН, 2012. - С. 67-68.

13. Базаров А.Д. Проблемы проектирования и строительства каркасных зданий в сейсмических районах Прибайкалья / Г.И. Татьков, В.Г. Баранников, А.Д. Базаров, Ю.А. Бержинский // Материалы УП Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию с международным участием. Сочи - 2007. - С 79-82.

14. Базаров А.Д. Стенд для вибрационных испытаний на сейсмостойкость малотоннажных (до 30 тонн) изделий / Г.И. Татьков, В.В. Толочко, А.Д. Базаров // Каталог научно-технических разработок и инновационных проектов Республики Бурятия. – Улан-Удэ, 2006. – С. 62–63.

15. Базаров А.Д. Реализация технологии активного и пассивного сейсмомониторинга на Байкальском геодинамическом полигоне / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров, Г.И. Чебаков // Труды международной научной конф. «Математические методы в геофизике». Новосибирск, 8-12 октября 2003. – Новосибирск, Изд-во ИВМиМГ СО РАН, 2003- С. 536 - 540.

16. Базаров А.Д. Сейсмологический и вибросейсмический мониторинг уровня сейсмоопасности Центрального Прибайкалья / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров // Труды казахстано–российской междунар. конф. «Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска». Алматы, 2004 - Алматы, 2004. – С. 124–128.

17. Базаров А.Д. Вибросейсмический мониторинг на Южно-Байкальском прогностическом полигоне/ Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров // Материалы IV международного совещания по процессам в зонах субдукции Японской, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг «Взаимосвязь между тектоникой, сейсмичностью, магмообразованием и извержениями вулканов в вулканических дугах». Петропавловск-Камчатский, 21–27 августа 2004 г. – Петропавловск-Камчатский, 2004 – С. 227–228.

18. Базаров А.Д. Возможности среднесрочного прогноза землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, Г.И. Чебаков, А.Д. Базаров// Труды V российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. Истомино, Бурятия, 23-28 сентября 2004 г. – Иркутск, 2005. – С. 53–56.

19. Базаров А.Д. Вейвлет и Фурье анализ магнитного поля эпохи 2000-2002 годов в связи с изменениями сейсмичности Прибайкалья / Г.И. Татьков, А.Д. Базаров, Ц.А. Тубанов // Труды V российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. Истомино, Бурятия, 23-28 сентября 2004 г. – Иркутск, 2005. – С. 68–71.

20. Базаров А.Д. Сезонные изменения фазовых и амплитудных характеристик стационарного сейсмического поля вибратора ЦВО-100 / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров // Труды VI российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. Иркутск, 2006 г. - Иркутск, 2006. - С.122–131.

21. Базаров А.Д. Экспериментальные исследования изменений скоростей продольных и поперечных сейсмических волн на Южно-Байкальском виброполигоне / Г.И. Татьков, Ц.А. Тубанов, А.Д. Базаров // Труды VI российско-монгольской конф. по астрономии и геофизике. Иркутск, 2006 г. – Иркутск, 2006. – С. 92–97.