

На правах рукописи



БАСАКИНА Ирина Михайловна

**КОМПЛЕКС СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ
АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ
(НА ПРИМЕРЕ ПАМЯТНИКОВ СОЛОВЕЦКИХ ОСТРОВОВ)**

Специальность 25.00.10 – Геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте экологических проблем Севера Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., профессор

Феликс Николаевич Юдахин

Научный консультант:

доктор физико-математических наук

Наталья Константиновна Капустян

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Леонид Евгеньевич Собисевич,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

доктор технических наук

Лев Николаевич Сенин,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН

Ведущая организация:

ФГБУН Институт геологии КарНЦ РАН

Защита состоится «16» марта 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного Совета Д 004.009.01 при ФГБУН Институте геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН по адресу:

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института геофизики им. Ю. П. Булашевича УрО РАН

Автореферат разослан « _____ » _____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.В. Хачай

Общая характеристика работы

Актуальность. Современный подъем отечественной экономики отражается, в том числе, в разворачивании реставрационных работ для сохранения культурного наследия. Диссертация нацелена на разработку комплекса сейсмических методов для диагностики состояния архитектурных памятников. За основу взяты памятники ЮНЕСКО – уникальные сооружения Соловецких островов, представленные совокупностью памятников архитектуры, характеризующимися различными реставрационными задачами.

Проблема диагностики состояния зданий и сооружений всегда была актуальна, т.к. связана как с безопасностью людей, так и охраной окружающей природы. Строительная наука и геофизика, в частности сейсмометрия, подходят к ее решению с разных сторон. Изучается результат внешних воздействий: при обследовании строителями – отражающийся в состоянии строительных материалов и конструкций здания, при сейсмометрических наблюдениях анализируется динамика сооружений. Сейсмометрические методы развивались в направлении изучения реакции здания на сильные воздействия. Это, прежде всего, классические разработки С.В. Медведева, Н.В. Шебалина, В.В. Штейнберга, Ф.Ф. Аптикаева, И.В. Ананьина, из зарубежных – работы ТИССС, А.В. Друмя, В.Г. Алказа и др.

Между строительной и геофизической науками, несмотря на значительную проработанность тематики, существует некий разрыв. Строители могут визуально отметить дефект, но оценить, насколько он опасен для здания, могут, как правило, на качественном уровне, на основании оценки специалиста-эксперта. Геофизики могут экспериментально установить факт наличия повреждений, локализовать их на объекте представляет определенную трудность, ещё сложнее оценить степень пригодности здания. Указанный разрыв подходов существенен, поэтому в конце прошлого века с развитием цифровой регистрации стали появляться разработки с попытками связать сейсмометрические наблюдения с оценкой целостности зданий. Это работы геофизиков: из ИГиГ СО РАН – В.С. Селезнева, А.Ф. Еманова и др., из ИФЗ РАН – Н.К. Капустян и др., а также строителей – А.М. Шахраманьяна, В.В. Гурьева, В.М. Дорофеева и др. Подходы основаны на сейсмометрической регистрации собственных колебаний зданий и сравнении их с расчетом, но методики заметно различаются по схемам наблюдений, обработке и интерпретации данных.

Особое направление данная тематика получила в ИЭПС УрО РАН, т.к. основной упор делается на диагностику исторических и сильно разрушенных зданий и сооружений (разработчики: Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, И.М. Басакина, основная идея защищена патентом RU № 2365896).

Развиваемые в диссертации методики актуальны и для конкретного практического применения – для реставрации памятников Соловков. На этой территории большое количество и разнообразие построек: культовых, административно-хозяйственных, фортификационных. Состояние их различно: от достаточно хорошо сохранившихся до практически разрушенных, что отражает бурную историю монастыря, известную как в России, так и за рубежом. В настоящее время идет возрождение Соловецкого монастыря – его материальных и историко-архитектурных ценностей.

Диссертация посвящена также актуальной для реставрации памятников проблеме – определению характеристик стройматериалов дополнительно к оценке физического состояния самого сооружения путем сопоставления наблюдаемых и расчетных параметров собственных колебаний сооружений.

Самостоятельной и важной задачей является прогноз внешних вибрационных воздействий на здание или сооружение, связанных с близостью их расположения к участкам забивки свайных полей или к другим техногенным источникам (железным дорогам и пр.).

Все это обосновывает актуальность экспериментальных сейсмических исследований для диагностики состояния архитектурных памятников.

Объект исследования: архитектурные памятники; сейсмические поля, создаваемые собственными колебаниями зданий и сооружений; грунты основания памятников; схемы мониторинга конструкций сооружений совместно с вмещающей грунтовой толщей.

Цель работы: исследование возможностей существующих геофизических методик обследования зданий, их развитие и разработка комплекса сейсмических методик для получения количественной оценки состояния архитектурных памятников, информативной для планирования реставрационных работ и мониторинга сооружений. Исследования проводятся на примере архитектурного комплекса Соловецкого музея-заповедника в Архангельской области.

Задачи, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели:

1. На основании литературного обзора рассмотреть два круга вопросов: с одной стороны, проанализировать существующие геофизические методики – их пригодность для обследования архитектурных памятников и информативность получаемых данных для реставрации. С другой стороны – выяснить, какие сведения о сооружении наиболее важны для его восстановления или мониторинга состояния.

2. Проработать оптимальные схемы выполнения наблюдений для обследования археологических памятников и оценки состояния конструкций и грунтов оснований архитектурных сооружений, используя комплекс сейсмических методик.

3. Разработать способы сопоставления экспериментальных данных, получаемых при сейсмической регистрации собственных колебаний зданий и результатов расчетов по компьютерной модели. Выявить параметры собственных колебаний, определяющие подбор компьютерной модели реставрируемого здания, принимаемой для планирования мероприятий по его восстановлению.

4. Представить возможности применения лучевой сейсмической томографии в обработке данных сейморазведочного метода преломленных волн для оценки состояния грунтового массива в основаниях историко-архитектурных памятников в условиях стесненной застройки.

5. Исследовать влияние импульсных сейсмических сигналов на сооружение, разработать способы прогноза воздействия на примере наиболее распространенного – при забивке свай вблизи памятника.

6. На примере памятников Соловецких о-в показать схемы и возможности мониторинга с использованием комплекса сейсмических методов, оценить информативность мониторинга для диагностики изменения состояния объекта.

Практическая ценность и реализация работы.

1. Представлен вариант неразрушающей сейсмической методики – экспресс-диагностики состояния памятников архитектуры, позволяющей оперативно оценить комплекс требуемых реставрационных работ.

2. Предложенная и запатентованная комплексная методика позволяет выявить факторы, ключевые для состояния здания, причем как в конструкциях, так и в свойствах грунтовой толщи его основания.

3. Разработан экспериментальный способ, позволяющий до проведения работ оценить допустимость внешних ударных сейсмических воздействий для сохранения состояния памятника архитектуры.

4. Комплекс сейсмических методик, составляющих основную часть диагностики, одобрен для включения в программу реконструкции Соловецкого монастыря – проектирования реставрационных работ и дальнейшего мониторинга сооружений.

Научная новизна работы:

– Предложен способ подбора строительной компьютерной модели исторического памятника, удовлетворяющей натурным сейсмическим наблюдениям и результатам расчетов динамики сооружений. Данная модель является базовой для мероприятий по реставрации и служит эталоном при мониторинге сооружений, включая состояние конструкций и грунтовой толщи основания.

– На реальных объектах опробованы различные модификации сейсмической диагностики, позволяющие дать количественный прогноз динамических воздействий на здания, расположенные вблизи стройплощадок с выполнением свайных полей, а также осуществлять контроль за состоянием здания.

– Показана перспективность применения алгоритма лучевой сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды в обработке данных метода малоглубинной сейсморазведки для инженерных и археологических задач при просвечивании грунтового массива в основаниях сооружений.

– Экспериментально показаны возможности исследования состояния сооружения при сейсмической регистрации колебаний разной природы: при техногенном ударном и ветровом возбуждении, под воздействием звука и инфразвука (колокольного звона). Совместно с линейными колебаниями, впервые проведена регистрация крутильных колебаний сооружений.

Обоснованность результатов: определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается численным и натурным моделированием, использованием статистического анализа и согласованностью результатов с данными других методик. Для обработки данных метода преломленных волн (КМПВ) использовался сертифицированный пакет «RadExPro+» (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Защищаемые положения:

1. Сейсмическая диагностика состояния архитектурных памятников основывается на комплексе натуральных наблюдений и сопоставлении их с результатами строительных расчетов динамики сооружений. Основой комплекса наблюдений являются две различные методики: сейсмическая регистрация в отдельных точках объема собственных колебаний зданий и профиля малоглубинной сейсморазведки для определения строения и скоростных свойств грунтов оснований, существенных для моделирования закрепления здания в грунте. Частоты и амплитуды разных мод собственных колебаний составляют основу для сравнения с расчетом и подбора компьютерной модели состояния здания.

2. Для реальных объектов, являющихся основными типами реставрируемых сооружений, созданы и опробованы различные модификации сейсмической диагностики, позволяющие осуществлять ключевые этапы реставрации: экспресс-обследование, инструментальное сопровождение его реконструкции, проведение мониторинга состояния, количественный прогноз последствий опасных динамических воздействий на здание, в первую очередь выполнения работ по забивке свай.

3. Экспериментально показана перспективность применения алгоритма лучевой сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды в обработке данных метода малоглубинной сейсморазведки для неразрушающих инженерных и археологических задач в условиях стесненной застройки, характерной для памятников. Методика позволяет вести просвечивание грунтового массива в основаниях сооружений до глубин 10 м и выявить контрастные скоростные неоднородности с характерными размерами в единицы метров.

Личный вклад автора: присутствует на всех этапах работы: при проведении полевых наблюдений и обработке данных.

Апробация. Работа над диссертацией была связана с выполнением исследований по плановой теме ИЭПС УрО РАН: грант «Диагностика и оценка динамики состояний уникальных сооружений при воздействии природных и техногенных факторов» 2009-2010 гг. Получен патент «Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения» RU № 2365896.

Основные положения диссертации доложены на международных конференциях: «Северные территории России: проблемы и перспективы развития» (Архангельск, 2008 г.), «Геологические опасности» (Архангельск, 2009 г.), «Экология арктических и приарктических территорий» (Архангельск, 2010 г.), «Развитие академической науки на родине М.В. Ломоносова» (Архангельск, 2011 г.), IV Международном научно-практическом симпозиуме «Природные условия строительства и сохранение храмов православной Руси» (Сергиев Посад, 2009 г.), VIII Международной Украинской научной строительной конференции «Строительство в сейсмичных районах Украины» (Украина, г. Ялта, 2010 г.), «Проблемы мониторинга Соловецкого архипелага» (Архангельск, 2008-2010 гг.), «Problems of Geocosmos» (Санкт-Петербург, 2010 г.), «Геотехнические проблемы мегаполисов» (Москва, 2010 г.), XII Уральская молодежная школа по геофизике (Пермь, 2011 г.), «Шестые научные чтения Ю.П. Булашевича. Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей»

(Екатеринбург, 2011 г.), «Актуальные вопросы мониторинга геологической среды и безопасности урбанизированных территорий» (Калининград, 2011 г.)

Публикации: по теме диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, получен патент.

Структура работы: введение, 4 главы, 100 рисунков, 10 таблиц, заключение. Объем работы 183 страницы. Список литературы включает 123 наименования.

Благодарности: автор глубоко благодарен своему научному руководителю – чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., профессору Феликсу Николаевичу Юдахину за руководство, постоянную поддержку и внимание к работе, что способствовало её завершению. Особую признательность автор выражает д.ф.-м.н. Наталии Константиновне Капустян за научные консультации и помощь в проведении исследований. За творческое общение и дискуссии по отдельным вопросам автор благодарен к.т.н. Г.Н. Антоновской, к.ф.-м.н. Е.В. Шаховой, Б.Г. Басакину, А.Н. Климову, сотрудникам ИФЗ РАН д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкому, И.В. Фокину. За помощь в проведении полевых исследований диссертант признателен М.Н. Нилову, В.К. Таракановскому, С.А. Звягину, О.А. Черных, Я.В. Конечной, М.А. Воиновой и сотрудникам СГИАПМЗ Л.А. Петровской и А.Н. Соболеву.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, сформулированы основные цели и задачи исследования, защищаемые положения, оценена практическая значимость, представлена структура работы и её апробация.

В главе 1 рассматриваются проблемы, связанные с диагностикой состояния зданий и сооружений. Отмечена особенность сооружений европейского севера России – их подверженность «жестким» климатическим воздействиям, приведена краткая инженерно-геологическая информация района исследований на Соловецких островах.

Многие архитектурные сооружения подвергаются риску разрушения по естественным причинам, среди которых на первом месте - старение элементов конструкции. Особое внимание в главе 1 уделено природным и техногенным воздействиям, опасным для историко-архитектурных памятников. Более 80 % памятников архитектуры находятся в аварийном состоянии и причиной их разрушений становятся, в том числе, геолого-географические факторы (*Пашкин, 2005*).

При рассмотрении инженерно-геологического состояния грунтов оснований и процессов на окружающей территории можно выделить следующие причины деструкции памятников (*Дмитриев, 1997*):

- глобальные и локальные изменения природных условий функционирования сооружений, связанные с длительным сроком их существования;
- искусственное, целенаправленное изменение режима эксплуатации сооружения;
- ошибки в расчетах и представлениях, имевшие место при строительстве или реконструкции сооружения, неучтенные неоднородности основания, возможности развития геологических процессов.

К этому можно добавить рост вибрационной нагрузки от производств с мощными высокооборотными агрегатами, от транспорта и пр. Все это провоцирует достаточно широкий круг процессов в среде, приводящих к изменению ее напряженно-деформированного состояния (*Садовский, 1981; Николаев, 1994; Капустян, Юдахин, 2007*). Помимо сейсмических и ветровых воздействий на реальное здание действуют слабые колебания разнообразной природы – от инженерных коммуникаций и пр. (*Жигалин, 2005*).

Существенными вопросами инженерных решений сейчас становятся вопросы расчета усталостных явлений, причем как строительных материалов, так и грунтов. Особенность проблемы состоит в том, что «работающие» здесь явления многоциклового усталости для слабых и долговременных воздействий практически не изучены (*Капустян, Юдахин, 2007*). Таким образом, проблема учета при строительстве разнообразных природных и техногенных вибровоздействий порождает круг задач, основой для которых является получение экспериментальных данных о динамике сооружения.

Методология научного познания при рассмотрении сложных явлений рекомендует применять системный подход. Такое направление по изучению исторических природно–технических систем «памятник – геологическая среда» развивает проф. Е.М. Пашкин, который проводит анализ причинно-следственных связей, приводящих к деформации памятников, т.е. исследование причины деформации строительных конструкций как результата взаимодействия памятника с внешней средой с упором на изучение грунтов оснований памятников и возникающих там процессов. К явлениям, протекающим в грунтах оснований, относятся (*Маслов, 1971*):

- нарушения прочности грунтов оснований в результате концентраций нагрузок, превышающих допустимые (явления выпора грунта, сдвиг и т. п.);
- уплотнения грунтов оснований под действием статической и динамической нагрузок (явления осадки грунта);
- действия на грунты подземного потока (явления выноса грунта – суффозия, растворение, повышенная фильтрация и т.п.);
- нарушения устойчивости грунтов на склонах (оползни);
- землетрясения.

Как правило, уязвимыми местами конструкций памятников являются зоны (*Пашкин, 2005*):

- сопряжений и переломов конструкций (стыки, деформационные швы, сопряжения зданий различной этажности, сопряжения кровли с трубами, парапетами, стенами и т.п.), пропуска коммуникаций через стены, наибольшего износа защитных покрытий;
- приложения сосредоточенных нагрузок (опорные части колонн, пилястры, простенки, перемычки и т.п.);
- вероятного увлажнения конструкций: сопряжения стены с цоколем, цоколя с фундаментом и отмосткой, места пропуска водосточных труб, водометов через карнизы, места возможного скопления атмосферных вод и подтопления фундаментов, излома и сопряжения горизонтальной и вертикальной гидроизоляций.

Таким образом, сведения о грунтах основания являются ключевыми в реставрации. Далее рассмотрены основные приемы устройства фундаментов, и сопряжения с надземными конструкциями, в качестве примера показан характерный для Русского Севера каменный кремль Соловецкого монастыря (*Скопин, 2005*), представлены основные методы обследования, принятые в строительстве и реставрации.

На основании литературного обзора проанализированы существующие геофизические методики – их применимость для архитектурных памятников и информативность получаемых данных для реставрации. Особенность реставрации состоит в том, что рассмотренные инструментальные методики играют не самостоятельную роль, а являются вспомогательным звеном строительного проектного решения. Круг решаемых задач велик, но для каждого отдельного объекта можно определить свой первоочередной комплекс применяемых методик, позволяющий определить, какие сведения о сооружении наиболее важны для его восстановления или мониторинга состояния, а какие будут играть «справочную» роль. Критерием должно служить «полезность» методики для расчетной модели здания, которая определяет выбор того или иного проекта реставрации.

Таким образом, со стороны строительной науки подход должен быть следующим: на основании материалов обследований создается расчетная модель существующего здания, удовлетворяющая инструментальной оценке состояния здания, затем создается модель здания после реставрации – в имеющуюся модель вносят реставрационные мероприятия (укрепление фундаментов, устройство объемных вычинок стен или замена перекрытий и кровли и пр.). Далее по полученной модели реставрированного здания анализируют поля нагрузок и моментов и выясняют степень «жизнеспособности» реконструированного здания (*Басакина, Капустян, 2010*).

Для получения представления о целостности здания используются параметры его динамики, т.е. параметры движения точек объема при свободных колебаниях при динамических воздействиях, отражающие важные свойства объекта. В нормах по проектированию сейсмостойких зданий используется спектральная теория, основанная на учете спектра реакций при землетрясении (*Никитин, Кодыш, Трекин, 2010*). Идея использовать внешние воздействия разной природы (от сейсмических источников – естественных и искусственных, а также ветровых пульсаций) для диагностики зданий и сооружений сейчас активно разрабатывается, в том числе и нами (*Еманов, Селезнев, 2004; Капустян, Юдахин, 2007; Антоновская и др., 2011*).

Из анализа сейсмических методик мониторинга состояния зданий, различающихся источниками и применяемыми схемами обработки, следует, что они дают возможность получить оценки целостности здания, основанные на наборе параметров. В том числе, такие важные параметры, как значения собственных частот зданий, определяются материалом, объемно–пространственным решением надземной части, типом фундаментов и закреплением здания в грунте (*Шапиро и др., 1967; Антоновская, Янович, 2008; Улицкий, Шашкин, 2009*). Уже даже этот факт обосновывает применимость сейсмометрии и определяет тип методик, которые должны войти в комплекс методик по обследованию состояния архитектурных памятников.

Выводы главы 1:

1. Для диагностики состояния архитектурных памятников важным звеном является получение инженерно-геологической информации о взаимодействии геологической среды с памятником архитектуры. Сохранность фундамента и стен во многом зависят от процессов, протекающих в геологической среде.

2. Рассмотрен широкий набор геофизических методик, который может дать полезную информацию о составе и свойствах грунтов, существенно дополнить данные шурфов и скважин, носящих точечный характер, дать оценку качества фундаментных конструкций.

3. Экспериментальным путем с помощью сейсмических методик возможно определение динамических характеристик уникальных зданий. В компьютерный расчет модели здания закладываются параметры жесткостей и закреплений в грунте по экспериментальным данным.

4. Сейсмический мониторинг состояния зданий дает возможность зафиксировать снижение собственной резонансной частоты колебаний на некоторую величину, что указывает на снижение жесткости строительной системы. Это является важным критерием диагностики здания.

5. Существенное значение приобретает комплексирование двух методик: сейсмической регистрации собственных колебаний и сейсморазведочного метода преломленных волн для возможности получения динамических характеристик конструкций зданий (частоты и формы собственных колебаний) и скоростных характеристик грунтов оснований (для заложения в расчетную модель закрепления здания в грунте).

Глава 2 раскрывает вопросы построения систем и сочетания двух независимых и самостоятельных сейсмических методик: методики собственных колебаний и сейсморазведочного метода преломленных волн (МПВ) для анализа работы конструкции здания.

Приведен обзор инженерно-сейсмометрических станций, показаны основные схемы предварительной обработки сейсмических записей, разработанные в ИЭПС УрО РАН (Юдахин, Капустян, Антоновская, 2007). Для наших задач применялись сейсмометры СМ-3КВ (велосиметры) и акселерометры СМГ-5Т (Guralp®) с использованием автономных регистраторов GSR-24 (Geosig®), что позволило регистрировать в точке 3 компоненты вектора скорости смещений или ускорений, цифровая портативная баро-сейсмическая станция КБС (разработка ИЭПС УрО РАН).

Рассмотрены сравнительные характеристики некоторых современных специализированных цифровых инженерных сейсморазведочных станций; универсальный переносной разведочный комплекс Geode (Geometrics, USA) был применен нами для исследований грунтов оснований памятников. Схемы обработки сейсморазведочных материалов проводились с помощью специализированной программы обработки данных метода преломленных волн (МПВ), «RadExPro+» (МГУ им. М.В. Ломоносова). Часть материалов по объекту «Онуфриевская церковь» прошла дополнительную обработку в Институте физики Земли РАН в лаборатории математической геофизики под руководством С.А. Тихоцкого с использованием

алгоритма лучевой сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды (Фокин, Басакина и др., 2010, 2011). Более подробно материал рассмотрен в главе 4.

Особое внимание в работе уделено дальнейшей разработке способа регистрации собственных колебаний зданий, возбуждаемых ветровыми пульсациями (Юдахин Ф.Н. и др., 2005). Всякое сооружение, в нашем случае историко-архитектурный памятник, является колебательной системой с характерными параметрами, определяемыми материалом, конструктивной схемой (тип несущих конструкций, их сочленение, нагрузки) и взаимосвязью сооружения с подстилающими грунтами. Эти колебания можно рассматривать как гармонические амплитудно-модулированные сейсмические сигналы, анализ таких сигналов свидетельствует о состоянии конструкций (Юдахин, Капустян, Антоновская, 2007). С учетом нашей проработки технологически способ крайне прост и состоит в следующем. Сейсмические измерения на памятниках проводятся в течение нескольких часов в ключевых точках, затем по пространственному распределению амплитуд и фаз сейсмического сигнала на собственных частотах строят динамическую картину обследуемого объекта, примеры таких систем наблюдений на разных объектах Соловецкого комплекса рассмотрены в главе 3.

При сотрудничестве со строителями (использовании расчетных программ Лира®, MicroFe®, в которых задаются следующие параметры: жесткость стен и перекрытий, плотность материала, закрепление в грунте и т.д.) способ ветровых колебаний получил развитие и новую направленность. Был разработан «Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения», получен в 2009 г. патент RU № 2365896. Применение этого способа описано подробно в главе 3 на примере гостиницы Преображенской.

Основой способа является сравнение наблюдаемых и расчетных значений пространственного распределения амплитуд и фаз колебаний на собственных частотах для каждой из компонент (X, Y, Z). Расчеты динамики конструкции производят с учетом взаимодействия здания с основанием, используя материалы архитектурных обмеров, визуального анализа дефектов и сведения об упругих свойствах грунтов основания по данным малоуглубинной сейсморазведки. В случаях высоких зданий (колокольни) или постоянного сильного ветра в расчет добавляют ветровые нагрузки по данным измерений микробарографа параметров ветра. Экспериментальные данные по собственным колебаниям принимают в качестве эталонных. Анализируя величины отклонения расчетных значений от наблюдаемых, в расчетах задают изменения параметров строительных материалов или конструктивной схемы. Расчеты ведут до тех пор, пока не будет получено согласие с экспериментом в пределах ошибок эксперимента и расчетов. Если коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными кривыми не менее 0.9 и значения различий меньше, чем точность измерения, то за значения параметров физического состояния здания принимают значения, заложенные в расчетную модель.

Существует другой подход при наблюдениях микросейсм на инженерном сооружении в работах СО РАН (Еманов, Селезнев, Бах, 2010). Для реализации способа СО РАН важно выделение стоячих волн, которыми представлены разные моды собственных колебаний здания. Для этого используется расчет функции

когерентности между точками регистрации и выполняется процедура фильтрации волновых полей, «прослеживающая» стоячие волны в теле здания. Отметим различия этих способов: способ СО РАН значительно более детальный, но и более трудоемкий и дорогостоящий. В сравнении с ним наш способ может быть назван «способ экспресс-диагностики состояния здания», он может служить рекогносцировкой при обследовании сложных сооружений или достаточен для сильно разрушенных или простых по форме памятников (где доступно малое количество точек наблюдений). Длительность записи в нашем способе составляет от 10 минут.

При обследовании сооружений широко применяется методика искусственного возбуждения колебаний зданий ударами разной силы по зданию или вне его (*Шахраманьян и др., 1999*). Основные недостатки связаны с трудностью создания идентичного воздействующего сигнала для выполнения мониторинга.

В диссертационной работе рассмотрены возможности оценки состояний зданий при использовании разных сейсмических сигналов: импульсных от удара кувалды, сильных ударных воздействий при забивке свай или вибрационных при задавливании свай. Кроме ударов регистрировались поля короткопериодных микросейсм. Для тестирования выбрано здание гостиницы Преображенской, находящейся в аварийном состоянии. Так как основу интерпретации составляли колебания сооружения на собственных частотах, то измерения велись на здании на наиболее высоком из доступных уровней - на подоконниках второго этажа. Оценка состояния памятника по импульсным воздействиям как основного способа представляется малоэффективной, необходимы более плотные сетки наблюдений и интерпретации динамических характеристик сигналов с анализом волновых форм.

Наиболее интересным подходом стала регистрация колебаний под воздействием звука и инфразвука (колокольного звона). Для памятников архитектуры, особенно культовых, характерно включение в ансамбль колоколов или других мощных источников звука (башенные часы, било и пр.). Просматриваются два направления изучения механического воздействия звуковых волн на сооружения: с одной стороны, исследования свойств колокола как излучателя звуковых сигналов – его размеров, материала, формы, способа подвеса (*Нюнин, 1998, Гончаров, Куликов, 2009*), с другой – анализируются воздействия звуковых сигналов на сооружение - колокольную или соседнее здание (*Антоновская и др., 2009; Гончаров, Куликов, 2009*). При этом важными для зданий являются частоты в инфразвуковой области (ниже 40 Гц), которые могут быть резонансными для собственных колебаний небольших зданий на основных формах.

Исследование акустического воздействия на примере колокольных звонов каменной Колокольни Соловецкого монастыря (*Юдахин и др., 2007*) и деревянной Колокольни из с. Кушерека музея деревянного зодчества «Малые Корелы» показывает увеличение мощности колебаний колоколов на всех частотах, а на собственных частотах сооружений происходит усиление амплитуд колебаний примерно в 10 раз. Рассмотрено воздействие колокольного звона на состояние Преображенской гостиницы, расположенной на расстоянии примерно 500 м от звонницы Соловецкого монастыря. Доминирующая частота колебаний равна 20 Гц, в то время как собственные колебания сооружения составляют примерно 3 Гц. При

наблюдениях отчетливо прослеживаются волновые группы, распространяющиеся вдоль фасада с кажущейся скоростью примерно 600 м/с. Значение скорости и сравнение с данными малоглубинной сейсморазведки вдоль фундамента показывает, что инфразвук идет именно по конструкции. Кроме того, колебания на 3 этаже регистрируются раньше, чем на 1 этаже, что указывает на местоположение источника колебаний – инфразвуковая волна генерируется в основном в воздухе.

Экспериментальная сейсмическая диагностики применялась на сооружениях разного назначения: культового, фортификационного, административно-хозяйственного. Мониторинг исследуемых объектов с МПВ для оценки грунтов основания памятников был заложен нами в 2004-05 гг. На территории Соловецкого монастыря (внутри крепостных стен) в условиях плотной застройки наблюдения МПВ применялись в трех модификациях, отличающихся расположением профилей относительно просвечиваемого участка среды: продольные, непродольные и дуговые. На ряде объектов выполнено георадарное профилирование, что дало возможность сопоставить результаты интерпретации этих двух методик и выявить процессы, протекающие в грунтах их оснований под влиянием природных факторов и хозяйственной деятельности человека (*Басакина и др., 2011*).

Выводы главы 2:

1. Системы сейсмических наблюдений при обследовании памятников Соловецкого комплекса составляют часть научно-технического сопровождения реставрационных работ и лежат в основе дальнейшего развития методик комплексной диагностики уникальных объектов.

2. Выполнен подбор комплекта аппаратуры для комплекса сейсмической диагностики, как методом собственных колебаний (ветровых, колокольного звона, импульсных вибрационных и ударных воздействий), так и для сейсморазведочных работ МПВ. Показаны возможности, границы применимости и чувствительность методик, которые могут быть включены в комплекс обследования здания.

3. Связь волновых форм и частот инфразвука с параметрами сооружения открывает новую возможность проведения мониторинга состояния как конструкций, так и грунтов основания с помощью необычного сигнала – колокольного звона.

4. Мониторинг при использовании сейсморазведочных работ показывает динамику состояния грунтов оснований памятников, а при наблюдениях собственных колебаний – динамику конструктивной целостности сооружений.

5. Наблюдения, выполненные методом собственных колебаний и сейсморазведочным методом преломленных волн – основные при решении задач обследования состояния архитектурных памятников и анализа работы конструкции здания. Результаты георадарного профилирования дополняют интерпретацию материалов метода преломленных волн для выявления процессов, протекающих в грунтах оснований.

Глава 3 содержит примеры применения методики диагностики сооружений: оценки свойств стройматериалов, работы конструкций, влияния грунтов.

На объекте *ц. Вознесения* на Секирной горе о. Б. Соловецкий рассмотрен пример комплексирования методики собственных колебаний и сейсморазведочного метода (*Басакина, 2010 г.*). На спектрах мощности, рассчитанных по записям на здании (рис. 1а), выделяется серия максимумов на частотах 1.17, 3.7, 4.49 и 6.8 Гц.

Видно, что амплитуды колебаний на отмеченных частотах изменяются во времени. Этот факт и то, что эти частоты постоянно присутствуют на записи, демонстрирует СВАН диаграмма (рис. 1б).

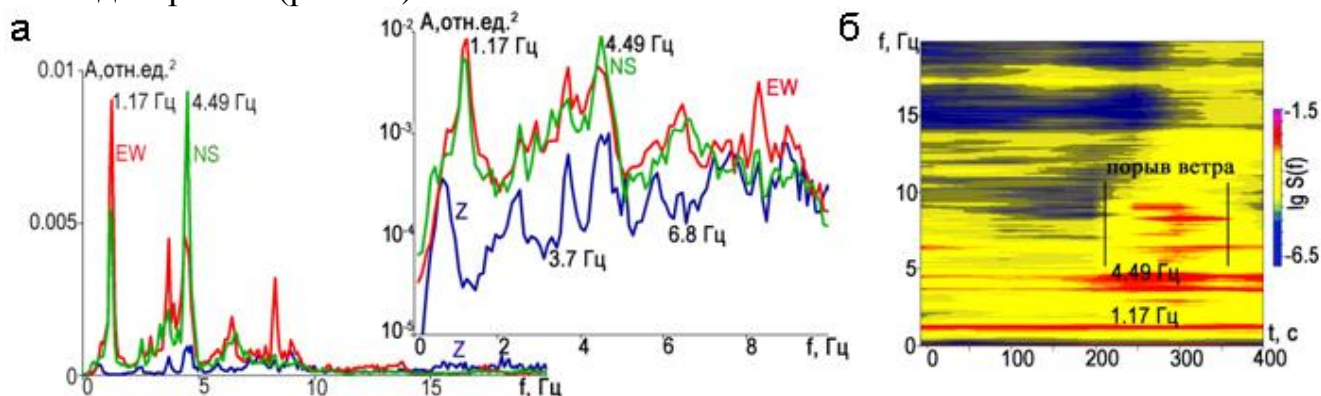


Рис. 1. Обработка записей: а) спектры мощности по записям велосиметров СМ-3 в линейном (слева) и логарифмическом (справа) масштабах на первом ярусе, ц. Вознесения, г. Секирная, б) СВАН-диаграмма записей колебаний церкви по компоненте север-юг

Для того чтобы получить величину амплитуды колебаний, статистически значимо характеризующее точку, для всего интервала наблюдений в скользящем временном окне определяется набор величин амплитуды для соответствующей частоты (для каждого окна) и строится распределение, по которому оценивается медианное значение (рис. 2а). Процедура применяется для каждой собственной частоты, каждой компоненты регистрации и каждой точки наблюдений. Важным параметром, характеризующим конструктивную целостность сооружения, является картина движения его частей при ветровых воздействиях. Чтобы представить траекторию движения точек сооружения строились диаграммы-ромбы: по осям X, Y откладывались амплитуды колебаний на соответствующих горизонтальных компонентах, последовательно перебирался весь набор частот (рис. 2б).

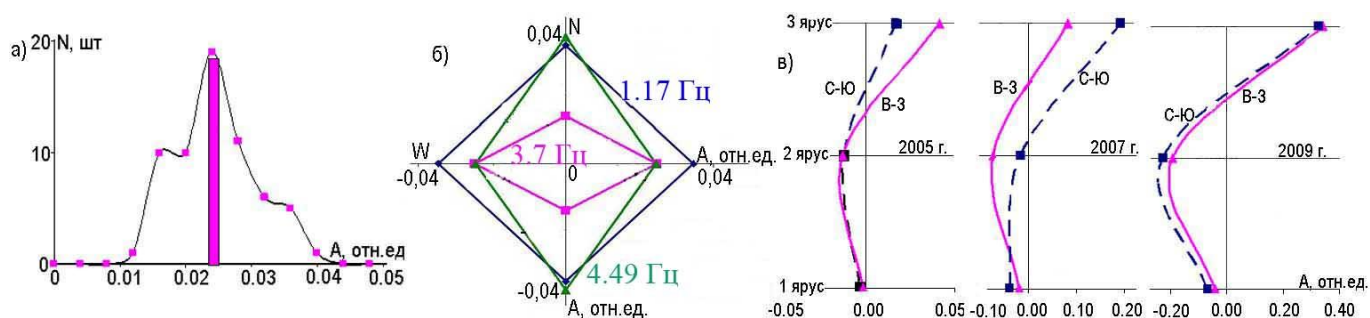


Рис. 2. Результаты обследования ц. Вознесения: а) определение медианного значения амплитуды сигнала по распределению амплитуд; б) представление траектории движения точек сооружения на диаграммах-ромбах; в) изменение с высотой амплитуд колебаний на собственной частоте 4,49 Гц, компоненты С-Ю и В-3 при мониторинге в различные годы

На рисунке 2в представлены результаты мониторинга ц. Вознесения в виде кривых изменения амплитуды колебаний по компонентам С-Ю и В-3 от высоты здания (1, 2, 3 яруса) и построенные с учетом фазовых соотношений перемещений. Наблюдения в разные годы выполнялись при различной силе ветра, что определило абсолютные значения амплитуд колебаний, но не влияет на соотношение величин. Особенностью размещения здания является преобладание ветров восточного

направления, что позволяет качественно сравнивать отношения компонент С-Ю и В-З. Сравнение кривых при мониторинге показывает: в 2005 и 2007 гг. наблюдалось различие между характером нарастания амплитуды с высотой по разным компонентам, что отражает разную эффективную жесткость конструкций по разным осям плана здания. При обследовании здания в 2009 г. кривые изменения амплитуды колебаний с высотой по компонентам С-Ю и В-З подобны, что свидетельствует о более изотропных жесткостных характеристиках, что следует ожидать при практически квадратном плане. Полученные результаты мониторинга отражают процесс реставрации храма, делающий его конструкцию более «цельной». Это также подтверждает чувствительность методики к изменению параметров конструкций (Капустян, Басакина, Антоновская, 2009).

Анализ данных обследования основания ц. Вознесения с использованием малоглубинной сейсморазведки позволяет утверждать, что древними строителями было произведено техногенное усиление грунта основания. Кроме того, анализ картины колебаний на разных ярусах показывает, что применение арки как конструктивного приема позволяет перераспределять ветровые воздействия.

Интересные результаты получены при исследовании грунтов основания **Белой башни**. Применение малоглубинной сейсморазведки в комплексе с георадиолокационной съёмкой позволило выделить аномальные зоны – зоны повышенной обводнённости, и области нарушений кровли водоупорного горизонта по профилю «озеро-море», проходящему вдоль Белой башни (рис.3).

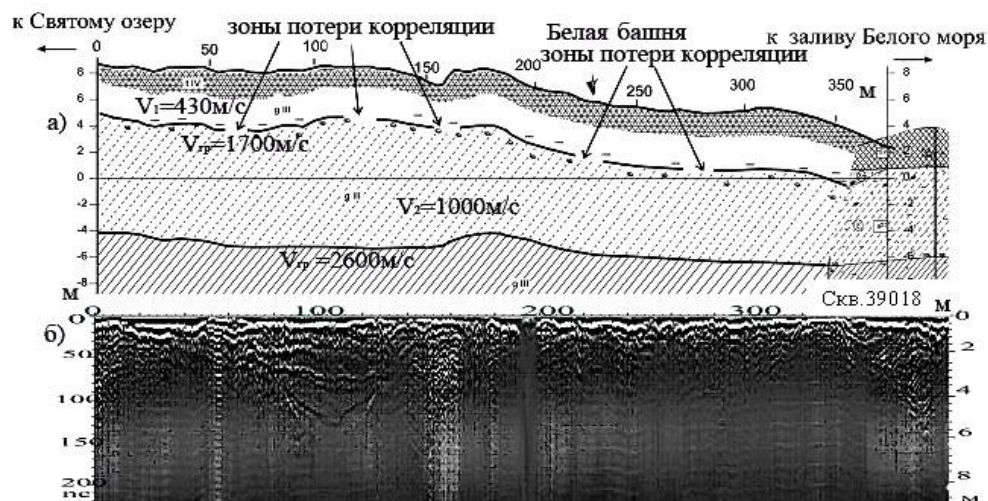


Рис. 3. Результаты многоканальных наблюдений: а) сейсмогеологический разрез МПВ по профилю «озеро-море» вдоль б. Белой (описание разреза см. в тексте); б) радарограмма по профилю «озеро-море»

В верхней части разреза под основанием башни наблюдается уплотнение грунтов, что отражается в увеличении средних скоростей до значений 410-430 м/с по сравнению с данными по крайевым профилям, огибающим башню – значения скоростей 350-380 м/с. Возможно, отмечаемое уплотнение выполнено как мероприятие по искусственному усилению основания. Средняя скорость до второго преломляющего горизонта однородна в пределах погрешности измерений, более низкие значения скорости (890 м/с) отмечены за башней. Значения граничной скорости второго преломляющего горизонта более стабильны, чем значения граничных скоростей первого преломляющего горизонта (Басакина и др., 2008).

Начатые в 2007 году наблюдения за состоянием **памятника архитектуры XIX в. гостиницы Преображенской** (рис. 4а) позволили выйти на создание новой

экспериментальной сейсмической методики, продемонстрированной на этом примере. Здание отличается простотой конструкции, необходимость реставрации памятника дала работам практическую направленность (Юдахин и др., 2011). При составлении расчетной модели (рис. 4б) основные проблемы были связаны с заданием параметров материала стен и перекрытий, условий закрепления здания в грунте. Для расчетных моделей использовали крупную (элементы 0.5×0.5 м) и мелкую (0.25×0.25 м) разбивки здания на конечные элементы. Сопоставление результатов расчета показало, что величина элементов практически не влияет на результаты расчетов.

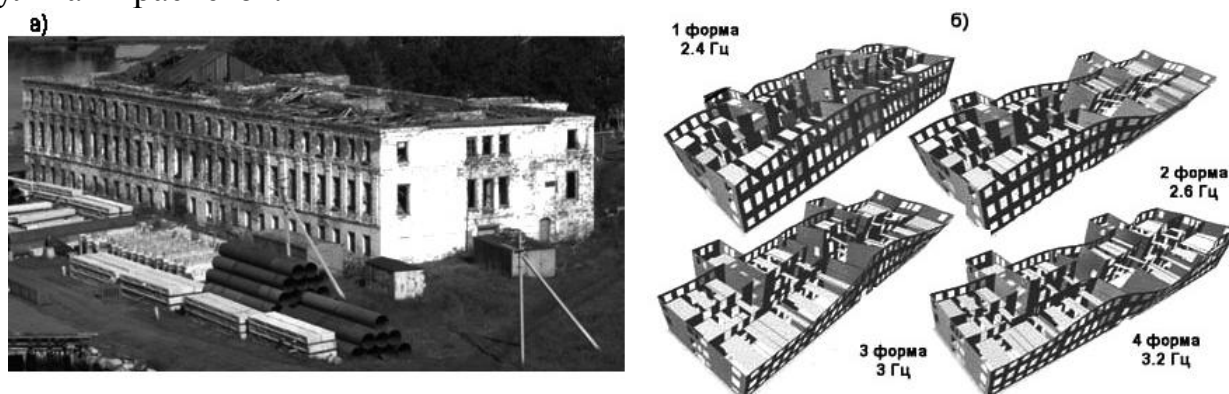


Рис. 4. Исследования Преображенской гостиницы: а) фото; б) расчетные формы собственных колебаний, (перемещения схематически увеличены)

Далее в расчетной модели предстояло вести перебор параметров жесткости – модуля Юнга E и плотности ρ материалов здания. Осложняет ситуацию достаточно плохое состояние ленточного бутового фундамента и основания здания, вследствие чего произошла неравномерная осадка, заметная даже визуально. В первом приближении этот факт не учитывался. Для получения картины динамики сооружения принимали осредненные, эффективные значения параметров здания, т.к. вся мозаика параметров детально не известна, экспериментальные данные по колебаниям, в свою очередь, характеризуются определенной погрешностью (не менее 10 %). На первом этапе были выбраны только данные по колебаниям наиболее интенсивной второй формы. Для моделей были выполнены расчеты с перебором основных величин (табл. 1), результаты которых далее сравнивались с экспериментальными данными.

Таблица 1. Расчетные параметры моделей здания Преображенской гостиницы

Индекс модели	Стены		Перекрытия		Собственная частота колебаний 2 формы, Гц
	E_c , кН/м ²	ρ , т/м ³	E_n , кН/м ²	ρ , т/м ³	
А	299200	1.8	3×10^6	2.2	8.13
Б	299200	1.8	3×10^7	2.2	6.39
В	192000	2.2	3×10^6	2.2	6.28
1	336000	2.2	$2,9 \times 10^6$	2.2	2.38
2	533550	2.2	$2,9 \times 10^6$	2.2	2.90
3	375000	2.2	$2,9 \times 10^7$	2.2	2.95

Экспериментальные наблюдения проводились по следующей схеме: один датчик неподвижен (корреляционный), другие – перемещаемые по точкам на здании, что позволяло «сшивать» данные, получаемые в разные моменты времени.

Датчики устанавливались по трем направлениям (Z, X, Y), наиболее информативными являются горизонтальные компоненты, ориентированные параллельно и перпендикулярно фасаду. Был промерен набор точек на фасаде, на угловых секциях, а также в ключевых для динамики здания точках (Юдахин, Капустян, 2008). Достоинства методики наблюдений: она неразрушающая и применима при ограниченной доступности точек.

Результаты расчетов показывают следующее:

– упругие характеристики для стен (E_c) и перекрытий (E_n) существенно влияют на значение собственной частоты, причем материал стен – в большей мере. Увеличение E_c в 1.5 раза (модели А и В) дает практически такое же изменение значения частоты, как изменение на порядок E_n (модели А и Б);

– наибольшее подобие по форме профиля колебаний и значениям частоты дает модель 2.

Следует отметить, что принятые параметры модели 2 в основном соответствуют материалу стен и перекрытий по визуальному определению материала. Попытка получения большего совпадения с экспериментальной кривой путем введения в расчет основных трещин или устранения части перекрытий практически не изменила картину. Тем не менее, полученный результат обнадеживает с точки зрения возможности путем несложных сейсмических наблюдений получить оценку параметров материала сооружения.

Исследования подстилающих грунтов основания гостиницы проводили с помощью сейсморазведочных работ и георадарной съемки. Результаты работ были сопоставлены с данными по бурению инженерно-геологических скважин (Отчет ТИСИЗ, 2006). На глубине 3 м первая преломляющая граница отделяет техногенные отложения и моренные пески от ледниковых отложений, представленных супесью пластичной, серого цвета, с прослоями песка насыщенного водой, с включениями гравия и гальки до 10 % (см. рис.3) (Юдахин, Антоновская, 2011).

Вторая преломляющая граница выявлена на глубине 8-10 м. Средняя скорость до границы - от 700 до 800 м/с, граничные скорости – от 2000 до 2400 м/с. Деформируемый слой основания гостиницы, т.е. слой до глубин примерно 10 м, по данным сейсморазведочных работ характеризуется средней скоростью продольных волн 500 м/с, что определяет условия закрепления здания в грунте и развития осадки. Результаты сейсморазведочных работ, сопоставленные с данными георадарной съемки и бурения, показывают неоднородное залегание грунтов основания, выделяются зоны обводнённости. Таким образом, основными природными причинами, вызвавшими деформации в фундаменте и стенах гостиницы, являются процессы, протекающие в грунтах: проявления морозного пучения, процессы суффозии, просадочные явления.

При сейсмических наблюдениях собственных колебаний здания на спектрах мощности полученных записей выделяется ряд максимумов (пиков) (рис. 5). Соответствия пиков собственным колебаниям должно удовлетворять следующими признаками: пик должен присутствовать во всех точках наблюдения; частота пика не должна быть кратна 50 Гц (связанных с вибрацией электрических машин); амплитуда пика - наибольшая на горизонтальной компоненте вкост стены; амплитуда первой формы увеличивается с высотой точки наблюдения; при ветровых

пульсациях временной ход амплитуд собственных колебаний коррелирован с ходом пульсаций давления на записях микробарографа (Антоновская и др., 2011). Это выполняется для здания с хорошим состоянием конструкций. Для «разбитого» здания (памятника архитектуры) первый признак – вездесущность пиков на определенных частотах – может не соблюдаться. Как видно из рисунков 5-7 частоты пиков «плавают». Все это может служить так же причиной трудностей определения собственных колебаний по методике СО РАН с когерентной фильтрацией.

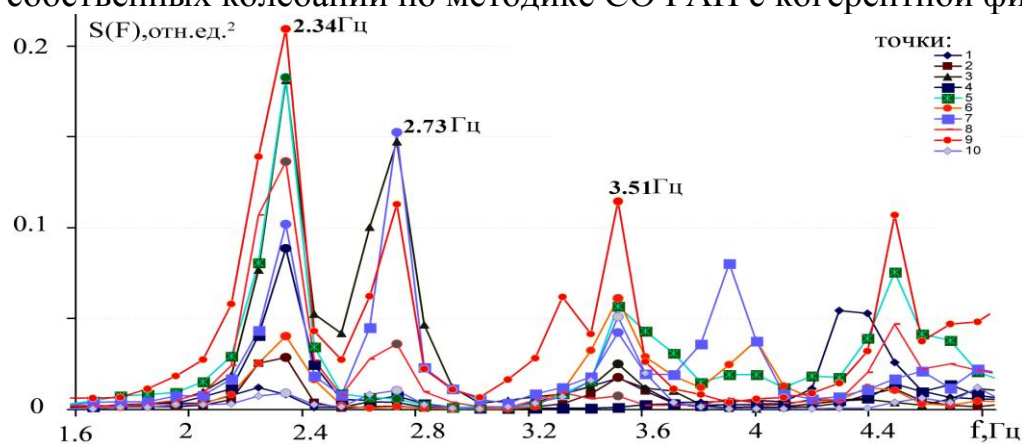


Рис. 5. Спектры мощности при регистрации микросейсм в разных точках (окнах) Преображенской гостиницы

По выделенным частотам здание можно разбить на некоторые блоки, которые характеризуются индивидуальным поведением. Природа отмеченного явления – «плавания» собственной частоты для сильно разрушенного здания – связана с особенностью движения разных частей, скрепленных между собой достаточно податливыми связями и возможным проявлением нелинейности. При этом частоты с близкими значениями как бы группируются. Группы могут быть разделены достаточно большим частотным интервалом. Таким образом, просматривается некая закономерность – чем более «разбито» здание, тем шире максимум в спектре экспериментальных данных, т.к. по теоретическим представлениям он состоит из набора тонких пиков – мод собственных колебаний.

На этом основании считаем, что положение основного максимума частоты в зависимости от точки наблюдения и состояния здания может изменяться («плавать») на частотной оси. С учетом ограниченности длительности записи, т.е. точности оценки значения частоты, мы рассматривали полосу достаточно близких частот от 2.34 до 3.51 Гц.

При обработке проводился также расчет функций когерентности записей в точках i, j в частотной области (спектра когерентности): $K(f) = |S_{ij}(f)| / \sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}$, $|S_{ij}(f)|$ – осредненный взаимный спектр, $S_{ii}(f)$, $S_{jj}(f)$ – спектры мощности записей в точках. Когерентность показывает согласованность протекания колебательных процессов во времени и пространстве, в нашем случае на соседних каналах записи (точках здания), что позволяет сделать выводы о связи между фазами этих колебаний. На подборке по фасаду графиков когерентности (рис. 6) линиями и пунктиром показана своеобразная «корреляция» максимумов когерентности (фактически – отслеживание стоячих волн). Видно, что из собственных частот для левого блока здания большие значения когерентности (от 0.44 до 0.62) приходятся на частоту 3.125 Гц. Прослеживается также пик на частоте 2.73 Гц, но для него значения когерентности – от 0.27 до 0.48. Это указывает на то, что данные

колебания участвуют в суперпозиции, но они относительно слабые и больше маскируются микросейсмами, чем более интенсивные собственные частоты. Отметим, что корреляция пиков дает так называемое «штриховое поле», что по аналогии с сейморазведкой и ГСЗ является признаком раздробленности среды. Применение «когерентной фильтрации» по методике СО РАН (Еманов и др., 2004), которая проводится строго на выбранной частоте, а не подстраивается под «плавание» частоты, в данном случае малоэффективно, т.к. не даст непрерывного прослеживания стоячей волны.

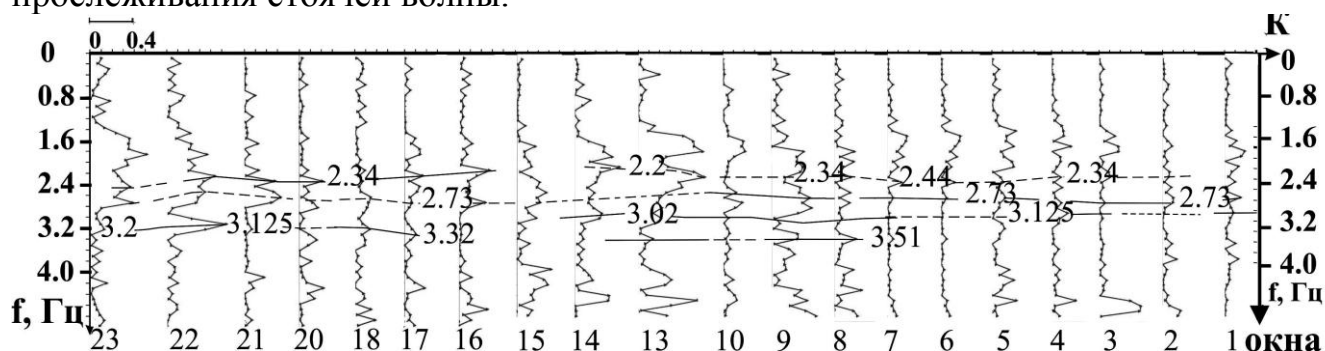


Рис.6. Расчет когерентности и выделение собственных частот на точках наблюдения. Штриховые линии - корреляция пиков когерентности

Таким образом, добавление к анализу спектров анализа когерентности дает возможность подтвердить результаты обработки с помощью независимого способа. Заметим, что мы анализируем функцию когерентности, используя количественные и логические оценки, но не проводим когерентную фильтрацию, как в методике СО РАН (Еманов и др., 2004), где работает количественный алгоритм обработки, что отличает подходы.

Помимо значений частот, для определения профиля формы колебания важны соотношения фаз при наблюдениях в разных окнах. Использование автономных регистраторов GSR-24, синхронизованных от GPS не дает нужной точности. Основу фазовых соотношений составляли наблюдения с велосиметрами, установленными на подоконниках в трех разных окнах и сведенные в единый файл данных станцией КБС. На основании выбранных частот с учетом соотношений фаз колебаний построен график распределения амплитуд вдоль фасада здания (рис. 7). Несмотря на флуктуации, доминирует профиль колебаний, соответствующий второй форме. Таким образом получена экспериментальная кривая формы колебаний гостиницы.

Сравнение результатов расчетов и эксперимента. Основой для сравнения являлось совпадения значений собственных частот и профиля амплитуд для наблюдаемых и расчетных форм собственных колебаний. Следует учитывать, что на временных интервалах, принятых для натуральных наблюдений (20-30 мин), по сейсмическим данным значение собственной частоты колебаний можно определить с точностью до 0.05 Гц, амплитуду – 20-30 % (Юдахин и др., 2010). Погрешности измерений возможны также из-за плохого сцепления мест установки (например, подоконников) с телом здания. Учитывая вариации частоты, разумно предположить, что в регистрируемый максимум представлен не строго одной формой, а

суперпозицией колебаний набора форм с близкими частотами. Расчёт амплитуды дан в полосе частот 2.4-3.3 Гц, что соответствует частотам 1-5 форм.

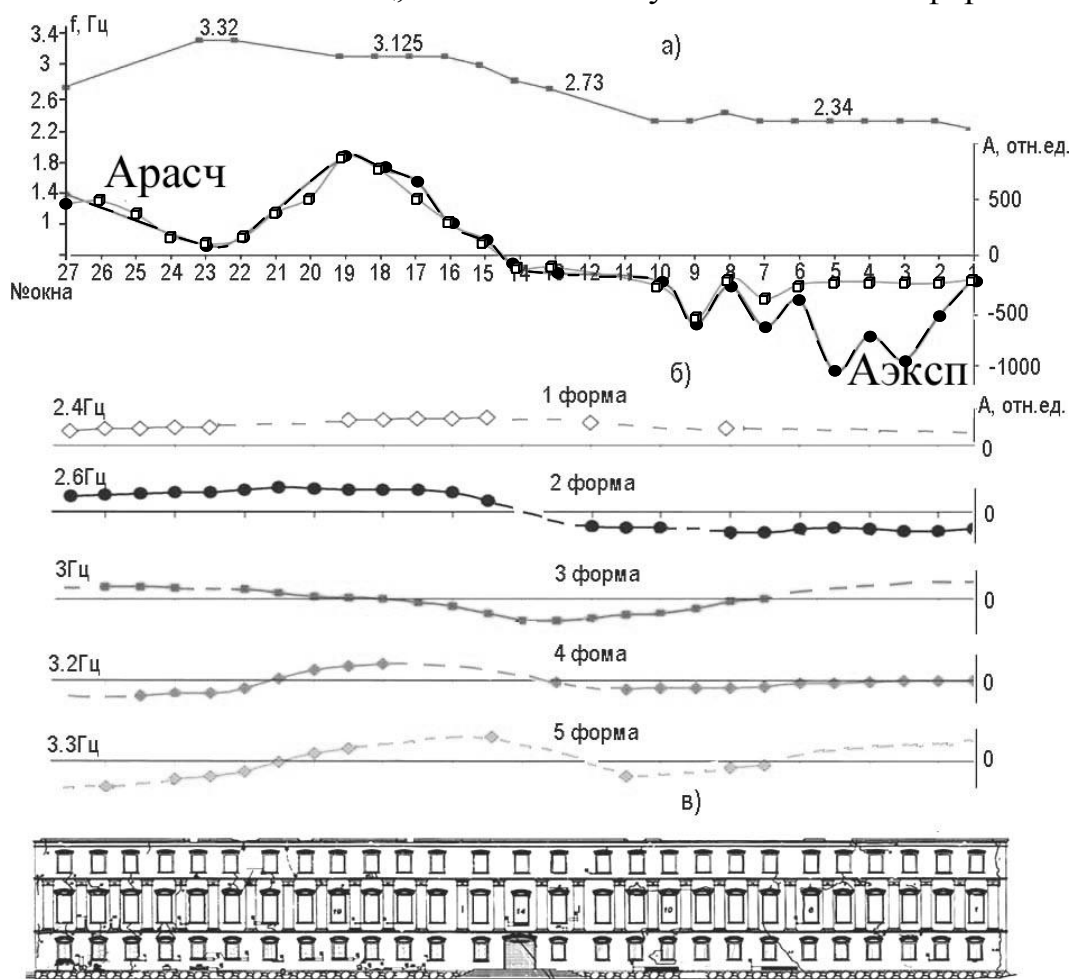


Рис. 7. Результаты экспериментального обследования Преображенской гостиницы: а) вверху – график значений частот, соответствующих абсолютному максимуму; внизу – экспериментальные и расчётные профили амплитуд собственных колебаний по точкам здания; б) расчётные значения амплитуд для форм колебаний; в) фасад здания

На основании расчетов и значений доминирующих частот наблюдаемого максимума подобрана суперпозиция расчетных колебаний, максимально удовлетворяющая экспериментальной кривой; к сложению принимались значения амплитуд с весовым коэффициентом 0 или 1, зависящим от величины доминирующей частоты. При этом предполагалось, что наличие трещин может существенно ослабить проявление соответствующей формы в конкретной точке. На рис. 7 видно практически идеальное совпадение расчетной и экспериментальной кривых (выпадают только окна 5 и 3, где плохие условия установки датчиков). В нижней части рис. 7 показано, в каких точках какие формы колебаний учитывались при суперпозиции. Видно, что 1 форма присутствует во многих точках левого крыла и отсутствует для правого, что связано, по-видимому, с разницей в сочленении стен с фундаментом вследствие выветренности контакта. Форма 2 присутствует практически везде, что подтверждает правильность принятой модели колебаний в качестве первого приближения.

Таким образом, методом подбора моделей, различающихся модулем деформаций кладки (E), получена расчетная модель здания, отвечающая его реальному состоянию.

На основе этой модели создают новую модель, в которую вносят все реставрационные мероприятия (в нашем случае – восстановление перекрытий) и проводят расчет, используя полученное значение (E). В результате расчета получают поля напряжений для «реставрированного» здания. Значения прочности в пятнах концентраторов напряжений сравнивают со значениями предельной прочности (R), определяемой соотношением $R=E_0/k\alpha$, (k , α – коэффициенты, зависящие от материала кладки, $E_0=E/0.8$ по СНиП II-22-81*), оценивая, тем самым, будет ли «нести» конструкция здания или надо еще дополнительные мероприятия.

Для гостиницы предельная прочность каменной кладки равна $R=280$ т/м² ($k=2$, $\alpha=200$). По результатам расчета для проекта реставрации только с восстановлением перекрытий $R_p=150$ т/м². Таким образом, получаем, что обеспечивается несущая способность здания «с запасом», т. е. не требуется дополнительных расходов средств на укрепления стен.

Одним из важных шагов в работе является **количественный прогноз вибровоздействий на здание** гостиницы Преображенской в связи с намечающейся реконструкцией причала бухты Благополучия (Басакина, 2008). Данная задача была решена путем ряда мероприятий:

1) проведено натурное моделирование на сходных грунтах (причал Красная пристань, г. Архангельск) – получены записи колебаний при забивке свай и от удара кувалды с определением истинных амплитуд скорости смещения: $A_{ист} = A_B / (K_{ЭМС} \cdot K_{ус} \cdot K)$, где A_B – амплитуда сейсмического сигнала (Вольты); $K_{ЭМС}$ – коэффициент электромагнитной связи сейсмометра; $K_{ус}$, K – коэффициенты усиления для предусилителя и окончного усилителя. В нашем случае: $K_{ЭМС}=150$ В/(м/с), $K_{ус}=100$, $K=1$.

2) определен коэффициент пересчета, равного отношению амплитуд сигналов при забивке свай и ударов кувалды: $k = A_{свай} / A_{удар}$.

3) проведены наблюдения на исследуемом здании – получены записи удара кувалды с последующим пересчетом к воздействию при забивке свай с использованием k (с умножением истинных амплитуд на коэффициент пересчета).

Таким способом были получены коэффициенты пересчета: для горизонтальной компоненты $k=10$, для вертикальной – $k=5.5$. Абсолютные уровни амплитуды предполагаемого воздействия при забивке свай на здания: по X – $A_{ист}^X$ свай = 1.3 мм/с, по Z – $A_{ист}^Z$ свай = 0.4 мм/с. Значения, определенные до проведения мероприятий, могут быть учтены в расчете воздействий и, тем самым, являются основой планирования реконструкции причала с учетом опасности разрушения исторического памятника. Существенно, что данный способ может легко быть превращен в алгоритм пересчета энергий и для других типов воздействий.

Результаты исследований, описанных в третьей главе, обосновывают первое и второе защищаемые положения. Выводы к третьей главе приведены в заключении (пп. 1-11).

Глава 4 показывает возможности малоуглубинной сейсморазведки при разных подходах обработки сейсмического материала при исследовании историко-архитектурных комплексов.

Для выполнения реставрационных работ памятников архитектуры необходима оценка состояния конструкций и фундамента, в том числе глубина его заложения в грунтах и степень сохранности. Существенно и выявление в основаниях сооружений археологических объектов, причем без проведения раскопок. Разработка такой методики с использованием сейсморазведочного подхода велась в натуральных условиях – на *Онуфриевской церкви* в 2008-2010 гг. (Фокин, Басакина и др., 2010).

В работе проведен краткий обзор применения современных сейсморазведочных методик в задачах инженерной геофизики, рассмотрены возможности построения скоростной модели среды методом сейсмической томографии, затронуты теоретические основы метода сейсмической томографии. Методы лучевой сейсмической томографии развиты уже достаточно широко и применяются в исследованиях трехмерных скоростных неоднородностей в Земле (Яновская, 1997 и др.).

Первые сейсморазведочные профили, выполненные нами для объекта стандартным методом преломленных волн (МПВ), позволили построить трехслойную скоростную модель, согласовать её с имеющимися геологическими данными района исследований. При просвечивании преломленными волнами по двум непродольным профилям было положено начало исследования скрытого фундамента под остатками сооружения Онуфриевской церкви. Полученная сейсмическая информация использовалась для следующего шага – построения скоростной модели среды методом лучевой сейсмической томографии. Цель метода – нахождения устойчивого и обусловленного экспериментальными данными решения в условиях неоднородной освещённости среды сейсмическими лучами. В автоматическом режиме проходил итерационный подбор скоростных характеристик среды при выполнении условия минимизации разности времен между наблюдаемыми и теоретическими годографами во всех точках наблюдения. Общее решение задачи сводится к решению системы линейных уравнений с большим количеством неизвестных, которое достигается способом алгебраической реконструкции.

В работе (Tikhotsky, Achauer, 2008) предложен алгоритм, осуществляющий автоматическую адаптивную параметризацию среды в терминах скоростей и глубин сейсмических границ (разрывов скорости первого рода) путём разложения неизвестных в разреженный ряд по вэйвлет-функциям Хаара. Прореживание ряда осуществляется исходя из оценки разрешающей способности по данным о плотности сейсмических лучей (лучевое покрытие) и разбросу их направлений (азимутальное покрытие). Данный алгоритм был адаптирован для нашего эксперимента по обследованию площадки с сокрытым фундаментом ц. Онуфриевская. Томографическая обработка велась на основе выделения первых вступлений преломленных волн. На первом этапе было использовано 532 луча, просвечивающих среду основания объекта. Доказана применимость метода обработки, построены сечения восстановленной скоростной модели. Из-за неполного лучевого покрытия модель получилась сильно неоднородной и содержит

много мелких скоростных аномалий, достоверность которых сомнительна, что может быть объяснено малым объемом данных.

Проведено численное моделирование, на основании которого разработан план проведения второго этапа полевых сейсмических исследований с 48 пунктами возбуждения (ПВ) и 288 пунктами приема (ПП). Источником колебаний служили удары кувалдой, прием проводился 12-канальной сейсмостанцией Geoda. Система наблюдений показана на рис. 8 (на срезе $Z=6\text{м}$) черными точками, контуры фундамента - красный пунктир. Длина каждого профиля 11 м, на профиле – 12 ПП через 1 м (длина профилей по диагонали – около 13 м, в зависимости от рельефа). Максимальный вынос ПВ – около 44 м, минимальный – 0 м. Источник возбуждения сигнала – тот же – механический, удары кувалдой по металлической пластине. Всего получена информация о 13824 временах пробега. Для расстановки типа «звезда» (вокруг фундамента) отработано 24 профиля.

В ходе обработки было проведено семь итераций. Среднеквадратическая невязка для модели начального приближения составила 3.1 мс, в процессе обработки была уменьшена в 3 раза до уровня в 1.1 мс.

Показана эффективность метода активной лучевой сейсмической томографии применительно к инженерным геофизическим исследованиям. Некоторые сложности при применении метода создает низкий градиент скорости в верхней части разреза, ответственный за возникновение «зоны тени» под изучаемым объектом. В этом случае предпочтительно размещение элементов системы наблюдений, например, приемников, на всей дневной поверхности над целевым объемом. Тем не менее, в ситуациях, когда пространство на поверхности над подземным объектом недоступно (застроено памятником), метод дает неплохие результаты для глубин более 1/3 минимального горизонтального размера объекта. При этом глубинность метода ограничивается размерами системы наблюдений и мощностью источника колебаний (Фокин, Басакина и др., 2011).

Разрешающая способность метода лучевой сейсмической томографии ограничена размером зоны Френеля сейсмической волны. В результате спектрального исследования сейсмических записей обнаружено, что продольная волна, регистрируемая в первых вступлениях, имеет центральную частоту около 100 Гц. При скоростях, характерных для изучаемого разреза, размер зоны Френеля будет составлять не менее 3 м. Поэтому, для более точного изучения небольших по размеру аномалий (например, археологических объектов) наряду с методом лучевой сейсмической томографии необходимо применять моделирование и инверсию сейсмического волнового поля. Значительные перспективы также могут быть связаны с использованием поверхностных волн, которые хорошо выделяются на записях, полученных в эксперименте.

В процессе обработки выяснилось, что восстановить геометрию фундамента церкви не удастся, вероятно, по причине малой заглублённости фундамента и слишком низких скоростей в окружающих его почвах. Однако были выявлены характерные структуры на глубинах 3-9 м от дневной поверхности. Для проверки достоверности полученных результатов была проведена численная оценка разрешающей способности, при помощи шахматного теста, с линейными размерами ячеек 2, 3 и 4 м.

В результате работ 2009-10 гг. получена трехмерная скоростная модель участка археологических раскопок в терминах скоростей продольных волн (рис. 8). По результатам обработки выделена зона повышенных скоростей в южной части участка, предположительно, линза водонасыщенного песка (подъем зоны высокого градиента скорости 1200 м/с).

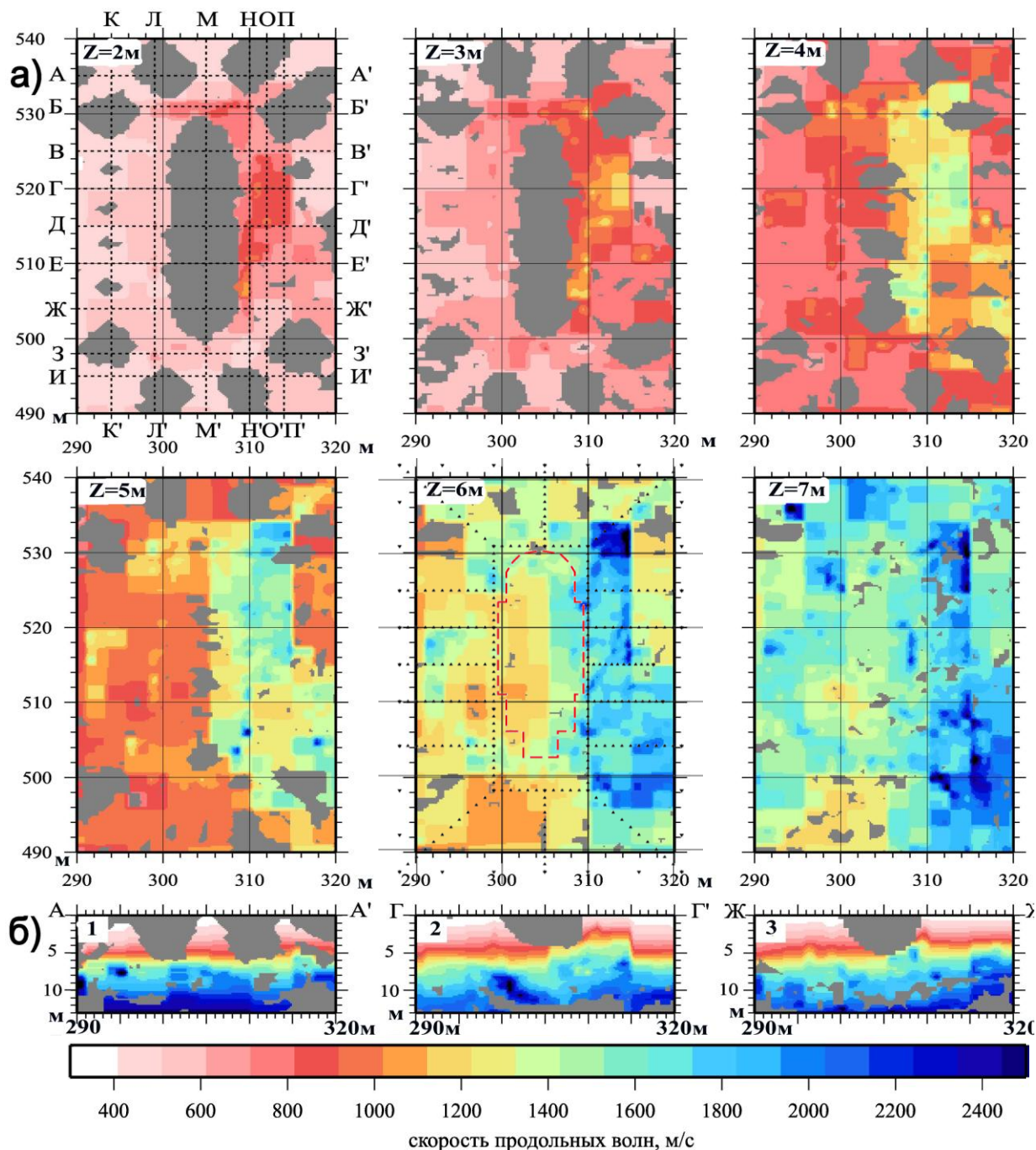


Рис. 8. Сейсмотомография ц. Онуфриевская: а) горизонтальные сечения восстановленной трехмерной модели на разных глубинах (Z); б) 1-3 – вертикальные сечения в направлении С-Ю; (Фокин, Басакина и др., 2011)

Результаты исследований, описанных в четвертой главе, обосновывают третье защищаемое положение. Выводы к четвертой главе приведены в заключении (пп. 12-15).

Заключение. На экспериментальных примерах показана возможность существующих сейсмических методик обследования зданий, их развитие и разработка нового способа их комплексирования для получения количественной оценки состояния архитектурных памятников, информативной для планирования реставрационных работ и мониторинга сооружений, что отражено в защищаемых положениях. В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Сейсмическая диагностика состояния архитектурных памятников строится на комплексе натуральных наблюдений. Основой комплекса являются две различные методики: сейсмическая регистрация в отдельных точках объема собственных колебаний зданий и профиля малоуглубинной сейсморазведки для определения строения и скоростных свойств грунтов оснований, существенных для моделирования закрепления здания в грунте.

2. Частоты, амплитуды и фазы разных мод собственных колебаний, полученные экспериментальным путем, составляют основу для сравнения их с результатами строительных расчетов динамики сооружений и подбора компьютерной модели состояния здания.

3. Путем сопоставления наблюдаемых и расчетных параметров собственных колебаний может быть получена оценка характеристик стройматериалов сооружения.

4. Экспериментальная картина перемещений при собственных колебаниях памятников может состоять из суперпозиции колебаний разных расчетных форм, но к сложению принимаются не все значения амплитуд, а с весовым коэффициентом в зависимости от наблюдаемой доминирующей собственной частоты.

5. Для подобранной реальной модели делают проект реконструкции и проводят расчет, в результате которого получают поля напряжений здания. Значения в «пятнах» концентраторов напряжений сравнивают с табличными значениями предельной прочности, определяя тем самым, будет ли «нести» конструкция здания, и нужны ли дополнительные мероприятия.

Выводы 1-5 обосновывают первое защищаемое положение.

6. Причины изменения в динамике конструкций могут быть связаны с просадкой грунтов, вызванных, в том числе, процессами обводнения и суффозии в указанной зоне. Дополнительным негативным воздействием, сказывающимся на изменениях в состоянии конструкций могут быть вибрации от постоянной работы дизельной электростанции (пример б. Белая).

7. Предложен способ количественного прогноза ударных и вибрационных воздействий на здание вблизи стройплощадок с выполнением свайных полей.

8. Детальность диагностики состояния архитектурных памятников, в том числе взаимодействия с грунтами основания, достигается путем комплексирования различных геофизических методик: малоуглубинной сейсморазведки и георадарного профилирования.

9. Связь волновых форм и частот инфразвука с параметрами сооружения открывает новую возможность вести мониторинг состояния как конструкций, так и грунтов основания с помощью необычного сигнала – сейсмической регистрации инфразвука от колокольного звона.

10. Мониторинг с использованием сейсморазведочных профилей показывает динамику состояния грунтов оснований памятников, а мониторинг при сейсмических наблюдениях на зданиях – изменения конструктивной целостности сооружений.

11. Комплекс натуральных измерений позволяет выявить наиболее ослабленные зоны в исследуемом объекте, а также дает возможность восстановить пространственно-временную картину изменений, происходящих в конструкциях объектов. Исследования грунтов оснований сооружений показывают уязвимые места связи памятник – геологическая среда.

Выводы 6-11 обосновывают второе защищаемое положение.

12. Для инженерных и археологических задач в исследованиях строения и свойств геологической среды под зданиями и сооружениями показана перспективность применения алгоритма лучевой сейсмической томографии в обработке данных сейсморазведочного метода преломленных волн.

13. Для получения качественного восстановления геологической среды необходима достаточно густая система наблюдений и большой набор углов прохождения лучей просвечивания по всей среде. При малой сети лучевого покрытия необходимо опираться на дополнительную геологическую информацию.

14. Возможности проведения полноценных, равномерных по углам прохождения лучей, схем наблюдений предоставляются только при наблюдениях головных, прямых и поверхностных волн по методике непродольного профилирования. В остальных случаях неизбежны искажения истинной картины строения среды, проявляющиеся, прежде всего, в завышении размеров объектов вдоль основного направления хода лучей и ложных аномалиях вблизи источников и приемников.

15. Показаны возможности этого томографического метода в изучении сейсмогеологических объектов инженерной геологии, в частности для задач реставрации. Разработка и апробация таких исследований, возможность обработки этих данных алгоритмом лучевой сейсмической томографии и интерпретация полученных результатов имеет практическую ценность для археологических и реставрационных работ.

Выводы 12-15 обосновывают третье защищаемое положение.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Басакина И.М. Опыт комплексирования геофизических методик для диагностики состояния конструкций архитектурных памятников // Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки, 2010, № 4. С. 5-9.

2. Фокин И.В., Басакина И.М., Капустян Н.К., Тихоцкий С.А., Шур Д.Ю. Опыт применения сейсмической томографии для археологических исследований оснований памятников и фундаментов зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. № 2. С. 21-34.

Патент:

3. Патент RU № 2365896 «Способ определения параметров физического состояния здания и/или сооружения». Авторы: Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакина И.М., Янович А.А.

Монографии:

4. Г.Н. Антоновская, В.Э. Асминг, С.В. Баранов, Б.Г. Басакин, И.М. Басакина и др. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах // Под ред. член-корр. Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН, 2011.

5. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И. М. и др. Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения // М.: ИФЗ РАН, 2011.

Прочие публикации

6. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Экспериментальная оценка динамических воздействий от техногенных источников вибрации на сооружения // Будівкльні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) // Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» Міністерства регіонального розвитку та будівництва України. Вип. 73. Київ, ДП НДІБК, 2010. С. 655-660.

7. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Сейсмометрические методы прогноза ударных и вибрационных воздействий на проектируемые или реконструируемые здания // Геотехнические проблемы мегаполисов. Москва, ПИ «Геореконструкция», 2010 г. С. 1719-1726.

8. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Климов А.Н. Возможности сейсмометрического мониторинга реконструируемых зданий и хранилищ сжиженного газа // Предотвращение аварий зданий и сооружений: выпуск 9. – Москва, 2010. С. 206-220.

9. Фокин И.В., Басакина И.М., Капустян Н.К., Тихоцкий С.А., Шур Д.Ю. Лучевая сейсмическая томография в археологической и инженерной геофизике: методологические аспекты и применение к археологическим исследованиям на Соловецких островах // Международная конференция Problems of geocosmos. Санкт-Петербург. 2010. Рр. 184-185.

10. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмометрические исследования по оценке состояния памятников архитектуры при воздействии природных и техногенных факторов // Природные условия строительства и сохранения храмов православной Руси: сб. тезисов 4 Межд. Научно-практического симпозиума. Сергиев Посад: Московская патриархия Троице-Сергиева Лавра, 2009. С. 56-58.

11. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмометрический мониторинг памятников архитектуры при природных и техногенных воздействиях//Проблемы сейсмологии в Узбекистане. Ташкент. ИСАНРУз №.7.т.II. 2010. С. 79-83.

12. Басакина И.М., Капустян Н.К. Новые возможности геофизических методик для обследования природно-архитектурных памятников на примере охраняемого комплекса Соловецкого музея заповедника // Международный симпозиум «Экология арктических и приарктических территорий», г. Архангельск. 2010. С. 256-258.

13. Басакина И.М. Методика оценки воздействий внешних факторов на здание // Северные территории России: проблемы и перспективы развития: Материалы Всероссийской конференции с межд. Участием, 23-26 июня 2008: [Электронный ресурс].-Электронные, текстовые, граф. Данные.-Архангельск: ИЭПС УРО РАН, 2008.-1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

14. Нилов М.Ю., Басакина И.М., Антоновская Г.Н. Методика комплексной оценки состояния инженерных сооружений // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ГЕОС, 2008. С. 460-464.

15. Капустян Н.К., Басакина И.М., Антоновская Г.Н. Геофизические методики в оценке состояния архитектурных памятников на примере ц. Вознесения (Соловки) // Геологические опасности: Материалы XV Всероссийской конфер. с межд. Участием. Отв. ред. чл.-корр. РАН Ф.Н. Юдахин. – Архангельск, ИЭПС УрО РАН, 2009. С. 65-68.

16. Басакина И.М., Антоновская Г.Н., Фокин И.В. Опыт применения сейсмических методик для реставрационных работ // Актуальные вопросы мониторинга геологической среды и безопасности урбанизированных территорий: тез. докл. 1-й междунар. Конф.- Калининград, 2011. С. 153-156.