



АНТОНОВСКАЯ Галина Николаевна

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНО-СЕЙСМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
И КОНСТРУКТИВНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2007

Работа выполнена в Институте экологических проблем Севера Архангельского научного центра УрО РАН

Научный руководитель

чл.-корр. РАН, доктор геол.-мин. наук, профессор

Феликс Николаевич Юдахин

Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук

Наталья Константиновна Капустян

Официальные оппоненты:

доктор геол.-мин. наук, профессор

Владимир Иванович Бондарев

доктор техн. наук, профессор

Александр Леонидович Невзоров

Ведущая организация:

Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта

Защита состоится **17 мая в 13 часов** на заседании Диссертационного Совета Д 004.009.01
Института геофизики УрО РАН по адресу:
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института

Автореферат разослан « _____ » _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор



Ю.В. Хачай

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Земная кора и особенно ее континентальная часть в последние полвека в связи с бурным развитием цивилизации, ростом населения и крупных мегаполисов находится под воздействием слабых, но постоянно присутствующих механических вибраций, производимых при работе разнообразных промышленных агрегатов, средств транспорта и прочих устройств, созданных человеком. Одним из широко распространенных источников техногенных колебаний являются здания и инженерные сооружения, возбуждаемые воздействием ветровых пульсаций и передающие сейсмические сигналы в грунт. Это создает предпосылки для включения сигналов данного типа в круг невзрывных источников сейсмических колебаний для исследования геологической среды. Учитывая, что такой способ получения сигналов является бесплатным, использовать его заманчиво. При этом необходима постановка детальных исследований свойств этих сигналов для разработки экспериментальных методик. Эта актуальная задача отражает практическую сторону проблемы.

Не менее актуально изучение техногенных сейсмических сигналов с фундаментальной точки зрения – как ее факторов, постоянно воздействующих на породы земной коры в связи с неуклонным ростом урбанизации и технического оснащения производств. К настоящему времени накоплен достаточно убедительный набор данных о процессах в геологической среде и в конструкциях сооружений, провоцируемых техногенным воздействием, в том числе вибрационным. Первым шагом является изучение параметров вибраций. Не менее интересна возможность отслеживать с их помощью процессы в геологической среде. Постановка таких исследований важна для решения экологических проблем и обеспечения безопасности функционирования промышленных объектов, городов, транспортных путей и пр.

Ключевым полигоном для изучения техногенных вибраций, в особенности ветровой динамики инженерных сооружений, выбрана территория г. Архангельска по следующим соображениям. Во-первых, городская среда Архангельска представляет собой достаточно сложную (но не перенасыщенную, как в Москве) динамическую систему, элементами которой являются все основные объекты антропогенных вибраций. Одновременно присутствует полный набор внешних воздействий: атмосферных, гидросферных и климатических.

Во-вторых, в г. Архангельске значительные площади занимают так называемые слабые грунты, в первую очередь торфяники. Присутствие их в разрезе является объектом особого внимания как геофизиков, так и строителей. Слабые грунты увеличивают сейсмическое воздействие на здания (расчетную балльность). Кроме того, они характеризуются значительным перераспределением напряжений и достаточно быстрым изменением их свойств во времени, что влияет на состояние инженерных объектов – приводит к непрогнозируемым осадкам зданий и сооружений, их кренам и, в конечном итоге, к авариям.

Инструментальный мониторинг состояния зданий выполняется в основном с помощью методик, которые можно разделить на три группы, различающиеся способами получения волновых полей и применяемыми схемами обработки.

1. Искусственное возбуждение колебаний зданий ударами разной силы по зданию или вне его (*Шахраманьян и др., 1999*). Основные недостатки связаны с необходимостью создания идентичного воздействующего сигнала для накопления отклика; доступны лишь отдельные части здания.

2. Воздействие на здание микросейсм и их регистрация на коротких профилях в здании с последующей корреляционной обработкой. Такая методика активно разрабатывается в Сибири (*Селезнев и др., 1999*). Работы ориентированы на здания и лишь косвенно затрагивают свойства грунтов основания.

3. Использование в качестве источника собственных колебаний зданий, возбуждаемого постоянно присутствующими пульсациями атмосферного давления. Регистрируются одновременно пульсации давления и ветровые колебания здания. Наблюдения могут вестись в одной точке, в том числе вне здания, это позволяет судить о состоянии здания в целом и изменениях в грунтах основания; детальное обследование здания проводится в нескольких ключевых точках (*Юдахин и др., 2004, Острецов и др., 2004*).

Идея таких наблюдений разрабатывалась нами и результаты представлены в диссертационной работе. Основной упор делался на исследование инженерно-сейсмических параметров оснований зданий и городских территорий. Проводились сопоставление прочностных свойств и сейсмическое микрорайонирование с определением приращений балльности и ускорений в долях g . Это очень важно при решении проблем размещения объектов особой важности таких, как атомная теплоэлектростанция (АТЭС), гидроэлектростанция (ГЭС), протяженные газопроводы и др., сопровождаемых задачами выявления разрывных нарушений в верхах земной коры.

Объект исследования: сейсмические поля, создаваемые собственными колебаниями инженерных объектов, здания и инженерные сооружения, грунты основания фундаментов, верхняя часть земной коры, вплоть до подошвы осадочного чехла, разрывные нарушения.

Цель – создание геофизического мобильного, технологичного и экономичного способа для изучения инженерно-сейсмических параметров грунтов на городских территориях и площадках строительства, для обследования конструктивной целостности зданий с применением неразрушающих технологий.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить ряд задач:

- исследовать параметры ветровых колебаний зданий, используемых для просвечивания среды;
- разработать техническое задание на создание специально ориентированной аппаратуры регистрации;
- предложить пространственно-временные схемы наблюдений;
- разработать способы обработки данных;
- провести опробование на тестовых натуральных объектах.

Практическая ценность и реализация работы – данная работа имеет, в первую очередь, практическую направленность в области инженерной сейсмологии, экологии и строительства. Представлен технологичный и экономичный способ, применение которого в разных модификациях позволяет оперативно обследовать состояния зданий и картировать грунты городских территорий на любых площадках практически без ограничения применимости и без остановки производства или жизнедеятельности. Существенно, что применение способа позволяет вести рекогносцировку для более детальных работ (например, сейсморазведки) при выявлении разрывных нарушений в осадочном чехле. Работа представляет интерес для наук о Земле, т. к. проводится исследование взаимодействия геосфер планеты – атмосферы и верхней части земной коры. Предлагаемый способ может быть эффективен при проведении оперативного мониторинга состояния грунтов оснований существующих зданий и застроенных городских территорий.

Работа выполнялась в соответствии с планом ФНИР Института экологических проблем Севера УрО РАН (ИЭПС УрО РАН) по теме «Изучение полей напряжений и взаимодействия геосфер по геофизическим и сейсмологическим данным на Европейском Севере», № 01.2001.15370.

Научная новизна работы

1. Предложен новый способ и разработан набор современных технологий для изучения инженерно-сейсмических параметров и конструктивной целостности зданий; способ экономичен и позволяет оперативно получать результаты.

2. В каждой из составных частей способа предложены новые подходы и оригинальные пути решения:

- использованы ветровые колебания зданий для обследования их целостности и для просвечивания геологической среды района размещения строительных объектов (изучение свойств грунтов оснований, сейсмическое микрорайонирование городских территорий и выявление разрывных нарушений в верхней части земной коры),

- предложена схема проведения точечных малоканалых сейсмометрических наблюдений и подбор аппаратурных средств,

- проведена обработка и интерпретация данных, в том числе с применением технологий картирования дефектов зданий и особенностей строения геологической среды на основании

динамических характеристик волновых полей, создаваемых колебаниями зданий под действием ветра.

Обоснованность результатов – определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается статистическим анализом и повторяемостью результатов и их согласованностью с данными других методик.

Защищаемые положения:

1. Собственные колебания зданий и сооружений, возбуждаемые ветровым воздействием, доступны для сейсмометрических наблюдений и составляют основу нового инструментального способа оценки и мониторинга инженерно-сейсмических параметров грунтов и конструктивной целостности объектов, пригодного для широкого класса объектов, не нарушающего городской среды и деятельности производственных и жилых объектов.

2. Реализация способа обеспечивается новым типом полевой аппаратуры, осуществляющей одновременную запись вариаций атмосферного давления микробарографом и трехкомпонентную регистрацию микросейсм в точке наблюдений. Разработан и опробован аппаратурно-программный комплекс, включающий цифровую портативную высокочувствительную баро-сейсмическую станцию и алгоритмы оперативной обработки данных, основанные на анализе динамических характеристик волновых полей ветровых колебаний.

3. Способ, использующий ветровые колебания, включает ряд технологий проведения натурных наблюдений, ориентированных на обследования зданий и на получение инженерно-сейсмических параметров территорий. Отличительной особенностью схем наблюдения являются точечные измерения, производимые в течение нескольких часов с последовательным перемещением по объекту. Разработаны и опробованы технологии:

- оценки состояния жилых и общественных сооружений, архитектурных памятников и аварийных зданий,
- сейсмического микрорайонирования на примере центральной части г. Архангельска,
- выявления разрывного нарушения в верхней части земной коры Беломорско-Двинского сейсмоактивного района Архангельской обл.,
- проведения инженерно-сейсмической рекогносцировки для размещения сейсмологических станций Архангельской сети.

Апробация. Представленная работа, в основном, экспериментальная, материалы получены автором лично и в соавторстве. Ее новизна закреплена патентом «Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения», RU 2242033 С1, приоритет 12.02.2004. Результаты работы были опубликованы в 35 статьях и лично доложены на конференциях: Молодежная международная конференция «Экология 2003», г. Архангельск, 2003 г.; Международная конференция «Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах», г. Архангельск, 2003 г.; Международная конференция «Строение, живая тектоника и дислокации платформ и их горно-складчатых обрамлений», г. Москва, 2003 г.; V Уральская молодежная научная школа по геофизике, г. Екатеринбург, 2004 г.; VII Сергеевские чтения, Москва, 2004 г.; VII Геофизические чтения имени В.В. Федынского, Москва, 2005 г.; VI Уральская молодежная научная школа по геофизике, Пермь, 2005 г.; XI Международная конференция «Строение, геодинамика и минерагенетические процессы в литосфере», г. Сыктывкар, 2005 г.; VII Уральская молодежная научная школа по геофизике, Екатеринбург, 2006 г.

Структура работы: введение, 5 глав, 96 рисунков, 15 таблиц, заключение, 3 приложения. Объем работы 170 страниц, библиография включает 173 наименования.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю члену-корреспонденту РАН, доктору геолого-минералогических наук, профессору Феликсу Николаевичу Юдахину. Особую признательность автор адресует доктору физико-математических наук Наталии Константиновне Капустян за научные консультации. За творческое общение и дискуссии по отдельным вопросам автор признателен академику РАН В.В. Адушкину, д.г.-м.н. В.И. Макарову, д.г.-м.н. Ю.К. Щукину, д.г.-м.н. И.В. Ананьину, сотрудникам ЦНИИЭП жилых и общественных зданий, сотрудникам Института экологических

проблем Севера УрО РАН Е.В. Шаховой, Б.Г. Басакину и И.Л. Ивановой, сотрудникам Соловецкого музея Л.А. Петровской и А.Н. Соболеву. Автор благодарен директору Института д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинову за критические замечания, способствующие усилению аргументации сделанных выводов. За совместную работу и всестороннюю помощь автор благодарит к.т.н. А.И. Мошкунова, Ф.Ш. Исламнурова и К.А. Мошкунова.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проведен краткий обзор района исследования, включающего г. Архангельск. Приведены геологические, тектонические, физико-географические, сейсмические и климатические характеристики района. Изучение серии карт - тектонических, блокового строения осадочного чехла, сейсмичности, магнитных и гравитационных аномалий (*Трифонов, 1996; Юдахин, 2002 и др.*) показывает, что г. Архангельск расположен в сложной геолого-геофизической обстановке, притом на сейсмоактивной территории, в верхах земной коры которой выделяются разрывные нарушения. Тем не менее, инструментальные данные о местоположении разломов и степени их активности практически отсутствуют.

Особое внимание уделялось инженерно-геологической изученности территории г. Архангельска, имеются данные по скважинам, представлен геологический разрез центральной части города (*Невзоров, 2000*). Практически на всей территории г. Архангельск развиты торфяные отложения мощностью от 3 до 16 м (75% площади) за исключением узкой полосы вдоль берега р. С. Двина, где выходят моренные отложения. Это определяет неблагоприятные для строительства условия на большей части территории города. Присутствие слоя торфа в сочетании с климатическими особенностями ослабляет несущую способность оснований зданий, что приводит не только к удорожанию строительства, но и существенно осложняет эксплуатацию сооружений. Имеются многочисленные примеры, иллюстрирующие последствия просадки грунта и связанных с этим нарушений в конструкциях инженерных сооружений (*Невзоров, 2000; Невзоров, Кубасов, 2001*). Существенно, что к неблагоприятным для строительства инженерно-геологическим условиям города может быть добавлен еще сейсмический эффект от местных землетрясений (*Юдахин, Французова, 2001*).

До проведения наших исследований не было представлений о сейсмическом микрорайонировании территории города. Таким образом, разработка способа инструментального исследования, позволяющего оперативно оценивать состояние грунтов и инженерных сооружений, определять приращения балльности и ускорение силы тяжести, становится весьма актуальной.

Глава 2 посвящена обсуждению существующих методик обследования городских территорий – оснований сооружений и проведения сейсмического микрорайонирования (СМР). В связи с тем, что проблема захватывает разные отрасли знаний, представлен ряд обзоров, включающих:

- основные принципы сейсмического микрорайонирования и существующие методики для асейсмичных или платформенных районов;
- строительные нормативы для оснований сооружений и динамики конструкций;
- современные представления о техногенных сейсмических воздействиях на территориях городов;
- основные требования к технологиям исследований инженерно-сейсмологических параметров и конструктивной целостности сооружений.

Проведенный анализ показывает, что задачи СМР решались в основном для сейсмически опасных районов, в меньшей степени – для районов с вечномерзлыми грунтами. В строительных нормативах (*СНиП II/7-81**) для зданий общего и, частично, специального назначения в асейсмичных районах не требовалось проведение СМР, работы выполнялись только для специальных объектов – АЭС, ГЭС и пр. (*ПНАЭ-4.1-87; Савич, Степанов, 2004*). Для сейсмоактивных районов используют методики, основанные на местных землетрясениях, взрывах или по микросейсмам (*Медведев, 1962; Гуляев, Дружинин, 2004*).

Микросейсмические колебания грунта представлены суперпозицией волновых полей разных типов и от широкого набора источников (*Рыкунов, 1967*). Использование поверхностных длиннопериодных волн от удаленных источников (в основном природного генезиса), легло в основу методики сейсморайонирования, широко развиваемой за рубежом (*Nakamura, 1989; Zaslavsky et al., 2003*). Нас интересовала другая составная часть микросейсм – короткопериодные сейсмические шумы в диапазоне частот 0,5–40 Гц. Параметры короткопериодных микросейсм в значительной мере зависят от грунтовых условий: от сейсмической жесткости грунта, плотности и мощности отдельных слоев (*Штейнберг, 1986; Антикаев, 2001*). На городских территориях природная составляющая, как правило, подавляется индустриальной компонентой. Таким образом, интенсивность микросейсм зависит от размещения и особенностей источников, а так же от свойств грунтов. Эта зависимость позволяет использовать микросейсм от техногенных источников для задач сейсмического микрорайонирования.

Обзор строительных нормативов для оснований сооружений и динамики конструкций (*СНиП 2.02.01-83**, *СНиП 2.01.07-85**) показывает, что пульсации атмосферного давления вызывают колебания объекта, в связи с этим рассматриваются особенности ветрового потока: воздействие ветра на здания и сооружения, нормативные значения средней и пульсационной составляющей ветровой нагрузки; расчет пульсационной составляющей ветрового давления на здание; допустимые ускорения колебаний здания; определение частот собственных колебаний сооружений и зданий.

Учитывая, что динамика сооружения передается в грунты его основания, приведен краткий обзор особенностей проектирования оснований сооружений, мероприятий по уменьшению деформаций оснований и влияния их на устойчивость сооружения (*СНиП 2.02.01-83**). Применение определенных конструктивных мероприятий и преобразование строительных свойств грунтов основания позволяют уменьшить «чувствительность» сооружений к деформациям основания.

Работами последних лет (*Гупта, Растоги, 1979; Николаев, 1994; Мирзоев и др., 1987; Маловичко, Ипатов, 2001; Дягилев, 2002; Капустян, 2003*) показано, что антропогенное воздействие на земную кору привело к изменению сейсмического режима ряда районов, в том числе к возникновению наведенной сейсмичности. Эти воздействия в основном статические или медленно меняющиеся. Помимо них, современные производства неотделимы от механических вибраций, создаваемых при работе крупных электрических машин, транспорта и т. д. Такие воздействия также провоцируют значительные изменения физико-химических свойств среды (*Капустян, 2002*). Таким образом, необходимы детальные исследования по оценке инженерно-геологических параметров, что неразрывно связано с построением карты сейсмического микрорайонирования территории.

Приведен обзор существующих методов обследования зданий и инженерно-геологических параметров оснований. Особенностью является то, что сооружения и грунты изучаются независимо. Большое количество способов нацелено на обследование геологической среды (*Медведев, 1962; Антоненко, Адиков, 1976; Василенко, 1972; Лютюев, 2001*). Обсуждается ряд способов по обследованию сооружений (*Селезнев и др., 1999; Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Под ред. Цибульчик, 2004; Шахраманьян и др., 1999; Острецов и др., 2004; Дорофеев и др., 2005*), первый наиболее близок к рассматриваемому в диссертации. Его идея основана на выделении стоячих волн, которые формируются в инженерных сооружениях. Анализ функции когерентности записей, полученных в разных точках здания, дает возможность выделить стоячие волны при собственных колебаниях зданий; построение амплитудных и фазовых распределений по объему сооружения позволяет выявить дефекты конструкции и ослабленные места. Недостатком способа является возможность ошибочного включения в обработку колебаний, наведенных на здание от других объектов при условии подходящего соотношения частот. Кроме того, изменения в грунтах основания могут быть выявлены лишь опосредованно.

В основе рассматриваемого в диссертационной работе способа лежит представление о том, что всякое инженерное сооружение является техногенным источником механических вибраций с характерными параметрами, определяемыми конструкцией и «закреплением» в

грунте. Рассмотрены вопросы как возможности подключения к обработке техногенных сигналов иной природы, так и их подавления как помех. Обобщение литературных сведений и наших данных показывает следующее.

1. Техногенные сигналы, излучаемые в среду, разнообразны как по механизмам возбуждения, так и по частотному составу. Основные особенности сейсмических техногенных шумов:

- абсолютный уровень и временные вариации микросейсм на площадках промышленных объектов определяются в первую очередь характером деятельности и набором работающих агрегатов;

- техногенные источники могут давать широкополосный сигнал, монохроматический или набор тонких линий (максимумов в спектре); источники сигналов, в том числе тонких линий, могут быть разнесены по площади;

- на промышленной площадке или в ее окрестности всегда можно выделить «собственный» источник для мониторинга, причем его стабильность во времени обеспечивает возможность следить за слабыми изменениями напряженно-деформированного состояния среды.

Идея применения «бесплатного» источника для изучения строения земной коры была предложена *Халевиным, (1975)*, который в качестве источника упругих волн использовал промышленные взрывы.

2. Одним из существенных для городских территорий источников техногенных гармонических сигналов, являются собственные частоты колебаний зданий и сооружений, возбуждаемые пульсациями атмосферного давления. Эти колебания принципиально иные по параметрам сейсмического сигнала, чем квазигармонические сигналы, вызванные вибрацией электрических машин. Каждое сооружение характеризуется не одной частотой, а набором значений, соответствующих разным формам колебаний. По литературным и нашим данным ветровые колебания зданий обладают следующими свойствами:

- значения собственных частот сооружений определяются материалом, объемно-пространственным решением надземной части, типом фундаментов, свойствами грунтов основания (*Шапиро и др., 1997, Отчет..., 2005*);

- каждое из значений частот характеризуется высокой стабильностью (вариации менее 1%) т.к. определяется конструктивным решением и может меняться только при значительных изменениях – например, в процессе строительства или эксплуатации (*Острецов и др., 2005*), при разрушениях (*Антоновская и др., 2006; Юдахин и др., 2006*). Стабильность частоты является одним из главных отличий ветровых колебаний зданий от сигнала, создаваемого электрическими и другими машинами и механизмами;

- экспериментально показано, что дальность регистрации собственных колебаний сооружений в условиях г. Архангельска – не менее 15 км без применения специальных мер группирования (*Юдахин и др., 2005*);

- сигнал на собственных частотах колебаний сооружений характеризуется амплитудой, существенно меняющейся во времени (*Юдахин и др., 2005*).

Приведенные материалы позволяют сформулировать требования к новому способу инструментальных исследований инженерно-геологических параметров и состояния зданий:

- простота в проведении (технологичность), экономичность, непринесение вреда окружающей среде,

- оперативность в получении и анализе данных.

- мобильность развертывания работ, гибкость схем наблюдений, использование принципа точечных расстановок, универсальность для применения как в городских, так и в полевых условиях.

Область применения способа: обследование состояния зданий, оценка физических параметров основания сооружения (грунтов, верхов земной коры), определяющих (по нормативам) пригодность участка территории для строительства; рекогносцировочное картирование территории, в том числе выявление разрывных нарушений и сейсмическое микрорайонирование города.

Выполнить эти требования достаточно сложно при имеющейся стандартной аппаратуре, необходимо создание нового аппаратурного комплекса. Техническое задание должно ориентироваться на выделение слабых сигналов, скрытых фоном микросейсм.

Выводы главы 2.

1). Антропогенное воздействие на земную кору приводит к изменению сейсмического режима территории. Глубинность проникновения сигналов от источников антропогенного происхождения в земную кору зависит от вида деятельности; затрагиваются не только верхи коры, но и более глубокие горизонты в кристаллическом фундаменте, причем наибольшее влияние вибраций отмечается на первых сотнях метров.

2). Картирование параметров техногенных вибраций на городских территориях имеет важное значение для целей сейсмического микрорайонирования и для экологического мониторинга территорий.

3). Выступающие в рельефе высокие инженерные сооружения, колеблемые под действием постоянно присутствующих пульсаций атмосферного давления, служат источником сейсмических сигналов, параметры которых дают возможность вести просвечивания среды городских территорий и судить о состоянии самого сооружения.

4). Для регистрации сигналов от ветровых колебаний требуется разработка системы наблюдений, обработки и интерпретации данных, а также создание специальной чувствительной аппаратуры для одновременной записи сейсмических сигналов и пульсаций атмосферного давления.

Глава 3 посвящена аппаратуре для исследований инженерно-сейсмических параметров и конструктивной целостности сооружений.

Требования к аппаратуре для обследования инженерных сооружений и территорий:

- количество регистрирующих каналов – от 4, определяется особенностью наблюдений микросейсм, когда принимается точечная схема измерений с последующим перемещением датчиков по площади;

- динамический диапазон для регистрации микросейсм – от 80 дБ (16 разрядов АЦП), что существенно меньше, чем при сейсмологических наблюдениях (*Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР, 1975*);

- возможность настройки параметров регистрации в поле и предварительной обработки с использованием портативного компьютера (notebook),

- частотный диапазон – от 0,2-0,5 Гц до 20-30 Гц с возможностью сдвига полосы до 60 Гц. Основной частотный диапазон определяется характерными собственными частотами колебаний зданий и полосой, принятой при сейсмическом микрорайонировании; расширение полосы в область высоких частот определяется параметрами эндогенного сейсмического излучения из блоковой раздробленной среды (*Кочарян, Стивак, 2003*),

- длительность непрерывной записи – до нескольких часов, определяется требованиями получения надежных оценок при статистической обработке (расчет спектров и выделение в них тонких линий, когерентности, спектрально-временного анализа),

- пространственно-временная привязка – обычно по GPS, возможно – по карте и по часам в компьютере (относительная точность по времени 10^{-5}), определяется тем, что в основе обработки лежат спектральные оценки, а не кинематика вступлений,

- потребление питания минимальное, для возможности автономной работы от аккумуляторов, габариты, вес также небольшие для обеспечения мобильности перемещения.

Существенно, что в наборе современных отечественных полевых станций не удалось подобрать устройств для возможности одновременной регистрации сейсмических сигналов и пульсаций атмосферного давления. Потребовалось создание новой станции, для чего было разработано техническое задание, по которому изготовлена портативная цифровая баросейсмическая станция – первый вариант КБС-1, с учетом доработок – КБС-2. Станция состоит из датчиков с предусилителями, сейсмических кос, питания, при необходимости GPS, компьютера-ноутбука и интерфейсного блока, осуществляющего прием, усиление, фильтрацию и аналого-цифровое преобразование (АЦП) сигнала для ввода в компьютер.

Выбор типов регистрирующих датчиков. Для микросейсмических исследований характерный уровень сигнала – единицы нм/с. С использованием предусилителей допустимо применение разных типов сейсмометров: СВ-5, СМ-3 и СМ-3КВ. Для наблюдений на зданиях уровни сигналов выше (от сотни нм/с до единиц мм/с); тут, по нашему опыту, при стационарной регистрации из отечественных датчиков хорошие результаты дают СМ-3 и С-5-С. Благодаря высокой чувствительности, нами были выбраны сейсмометры СМ3-КВ и СМ-3.

Станция КБС снабжена микробарографом, который служит для измерений атмосферного давления, в ней использован абсолютный датчик давления МРХ4115А. Блок измерения давления подключается к интерфейсному блоку по кабелю (косе) и содержит датчик давления, усилитель со смещением и НЧ фильтр второго порядка.

Выводы главы 3.

1) Среди существующих отечественных портативных цифровых сейсмических станций не удастся найти подходящей для решения поставленных инженерно-сейсмологических задач. В связи с этим было разработано техническое задание, на основе которого создана портативная цифровая баросейсмическая станция КБС-2.

2) Малоканальная сейсмическая станция КБС-2 ориентирована на одновременные наблюдения полей разных типов: пульсаций атмосферного давления микробарографом и микросейсм тремя взаимноортогональными сейсмометрическими компонентами, частотный диапазон – от 0,2-0,5 Гц и выше. Станция цифровая с 22-разрядным АЦП, предусмотрена возможность оперативного просмотра и первичной обработки материалов в поле. Длительность непрерывной регистрации – от нескольких часов и более определяется объемом твердой памяти.

В главе 4 предложены основные методические рекомендации и схема обработки для предлагаемого в работе способа. В основе способа лежит выделение монохроматических сигналов из микросейсм, в том числе существенно меньших по мощности, чем фон. Особенностью сигналов является непостоянство амплитуды во времени, что определяется порывами ветра и малым затуханием собственных колебаний зданий. Таким образом, эти колебания можно рассматривать как гармонические амплитудно-модулированные сейсмические сигналы. Изученный нами богатый опыт исследований по программе «Вибрационное просвечивание Земли» позволяет сделать обзор основных видов слабых сейсмических сигналов, применяемых для подобных исследований. Это – амплитудно-модулированные гармонические сигналы; частотно-модулированные сигналы; сигналы, накопленные синхронным и корреляционным способами. Данный обзор нам представляется необходимым для обоснования выводов о дальности распространения слабых сигналов и возможностях их использования при сейсмических исследованиях. Подробно рассматривается вопрос о точности выделения амплитуд собственных колебаний инженерных сооружений из всего спектра микросейсм.

Выбранный нами сейсмический источник работает постоянно, т. е. инженерно-сейсмологические наблюдения можно вести в течение нескольких часов и затем строить распределения амплитуд сейсмического сигнала. Пример экспериментальных наблюдений одновременно в двух точках (рис. 1) показывает, что получаются очень «добротные» нормальные распределения, что связано с фундаментальными свойствами ветровых пульсаций (глава 2). По распределениям оцениваются медианные значения, которые используются как характеристики амплитуд сейсмических сигналов в точках наблюдения.

Как правило, измерения проводятся одновременно в двух точках, одна из которых является опорной и располагается около источника. Обследование территории можно проводить и с одной сейсмической станцией, но при этом необходимо выполнить построение калибровочной кривой, учитывающей возможные изменения скорости ветра и соответственно ветрового давления в процессе эксперимента. Частично эти вопросы рассматриваются в главе 2, где показано, что изменение направления ветра лежит в пределах точности оценки амплитуд и оценены вариации ветрового давления при нормальном и сильном ветре.

На рисунке 2 приведены примеры калибровочных шкал для разных инженерных сооружений, находящихся в различных грунтовых условиях и ветровых зонах. Разный уровень наклона графиков говорит о необходимости построения калибровочной кривой для каждого

сейсмического источника, что делает способ менее оперативным. В идеале инженерно-сейсмические работы следует проводить с опорной точкой.

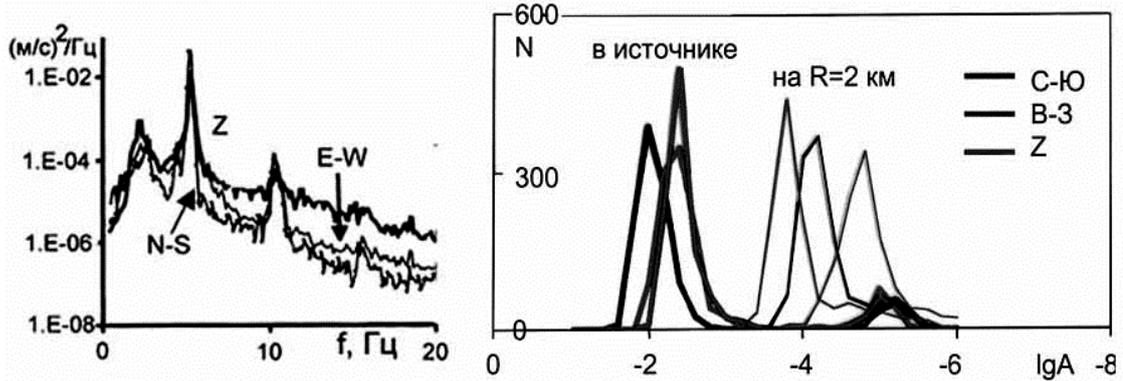


Рисунок 1 – Типичные спектры мощности микросейсм вблизи источника и распределения значений амплитуд для двух точек наблюдения вблизи источника и на расстоянии 2 км

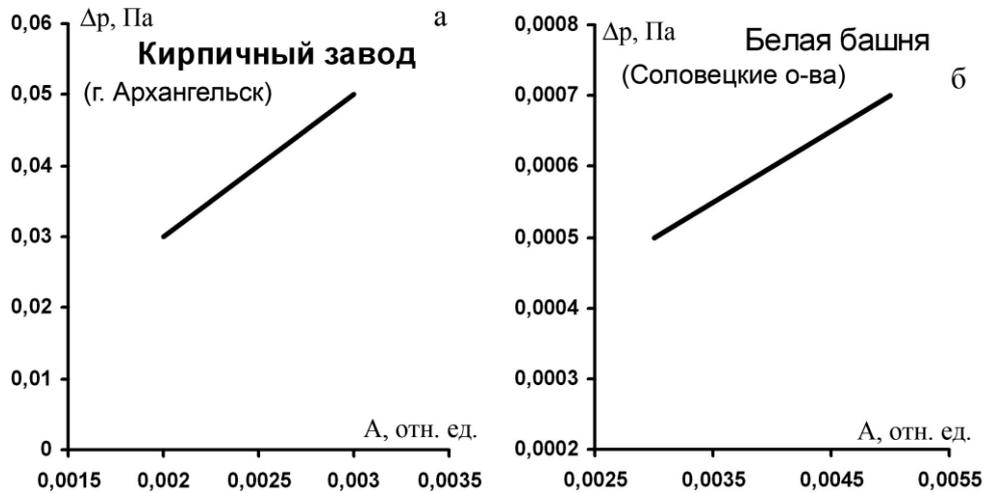


Рисунок 2 – Калибровочные кривые для разных типов инженерных сооружений

Важным вопросом проведения наблюдений является методика выбора пространственно-временной схемы наблюдений для зданий и для территорий, которая включает задание пространственного шага точек измерений, подбор интервала времени для регистрации, настройку параметров сейсмической регистрации в точке.

Местоположение точек измерений выбирают в зависимости от типа задач. В каждой точке устанавливают сейсмометры по 3-х компонентной схеме, ориентированные по странам света, либо по осям здания. Точки наблюдений на территории могут составлять профили, либо быть расположенными достаточно хаотично, их плотность определяется задачей, размерами площадки, длиной волны сигнала.

При выборе длительности регистрации необходимо учитывать спектр ветровых пульсаций. Проведенные нами специальные исследования показали, что длительность регистрации t в общем случае составляет не менее 1 ч, т. к. она должна заведомо превышать характерный период пульсаций атмосферного давления $T_{атм}$, т.е. при $T_{атм} = 1$ мин, $t = 1-2$ ч.

Сейсмическую регистрацию настраивают преимущественно подбором усиления, настройка осуществляется путем пробной обработки сигналов непосредственно в поле. В зданиях часто на разных компонентах требуются различия в усилении.

Проведение спектрального анализа предшествует тотальной обработке данных и включает подбор окна анализа, функции сглаживания, количества окон для осреднений. В диссертационной работе подробно показаны приемы обработки материалов на примерах высотного 24-х этажного здания и системы порталных кранов (г. Архангельск).

Алгоритм тотальной обработки сейсмограмм. Из микросейсм выделяют монохроматические сигналы, создаваемые в результате собственных колебаний выступающих в рельефе объектов. Для этого по исходным записям производят расчеты спектров мощности и выделяют резонансные частоты колебаний, которые проявляются в виде пиков в спектрах.

Расчеты спектров ведут, применяя быстрое преобразование Фурье во временном окне τ , подбирая длительность временного окна таким образом, чтобы резонансный максимум превышал подставку спектра в несколько раз. При выделении резонансных максимумов может оказаться, что в сигнале их присутствует несколько. Для дальнейшей обработки оставляют лишь те, для которых частота f отличается от значений $f = F_0/N$, где N – целое число, а F_0 – среднее значение частоты электрической сети, в России $F_0 = 50$ Гц. Это требование исключает из рассмотрения механические колебания, создаваемые электрическими машинами. Пространственное распределение амплитуд для сигналов с плавающей частотой будет давать смазанную картину и могут быть пропущены искомые участки пониженной прочности. Собственные ветровые колебания объектов характеризуются постоянным значением частоты.

Для резонансного максимума и соответствующего окна τ проводится цифровая фильтрация сейсмограмм для каждой из компонент X, Y, Z узкополосным фильтром с центральной частотой, равной найденной резонансной частоте максимума, и шириной фильтра Δf : $\Delta f = 1/\tau$.

Для полученных в результате фильтрации записей по трем компонентам проводится поляризационный анализ, в результате чего определяется тип сейсмических волн, доминирующих в регистрируемых собственных колебаниях. Затем определяют медианное значение амплитуды для каждой точки измерения путем построения распределения амплитуд. Полученное значение принимают за значение амплитуды для данной точки измерения в пространственной сетке. Совокупность значений может быть представлена в виде таблицы.

Обследование инженерных сооружений. По полученной таблице значений амплитуд в каждой точке для выбранной частоты строят карту распределения значений амплитуд в теле сооружения. Производя выделение пиков в спектре микросейсм, можно определить амплитуды колебаний на собственных частотах на каждой из компонент, что позволит восстановить характер движения точки здания. Сравнение движений в разных точках позволяет судить о напряженно деформированном состоянии сооружения, причем резкая смена характера движения может указывать на нарушения в материале, в том числе на наличие трещин. Сопоставление картин, полученных для разных значений собственных частот – основного тона и более высокочастотных гармоник первого и высших тонов, позволит разделять сооружения на блоки разного размера, что важно для определения размеров трещин и их проницаемости.

Обследование геологической среды. Используя таблицу с результатами сейсмометрической регистрации, производят нормирование амплитуд, рассчитывая их отношения к амплитуде в опорной точке. По совокупности значений амплитуд колебаний на резонансной частоте проводят анализ полученного пространственного распределения амплитуд. Далее для выявления аномальных зон, в том числе разломов, снимают пространственный тренд. Для этого, в соответствии с типом волн, из полученного пространственного распределения вычитают составляющую, характерную для закона изменения амплитуды с расстоянием для волн данного типа. Далее близкие по величине и по местоположению на сетке значения амплитуд объединяют в пятна-кластеры. По плотности, размеру, форме и расположению пятен, выявляют зоны, природу которых следует определить. Если площадку анализируют на присутствие разрывных нарушений, то в пространственном распределении амплитуд отмечают протяженные линейные зоны, в которых получены пониженные значения амплитуд по сравнению с соседними участками, поскольку зоны разломов поглощают энергию сейсмических колебаний.

Выводы главы 4.

1) Монохроматические сейсмические сигналы, создаваемые микроколебаниями зданий на собственных частотах (вплоть до сотых микрон), доступны для выделения с использованием спектрального анализа. Это дает возможность обследовать площади размером до десятков километров.

2) Представлена схема проведения инженерно-сейсмических работ и основные этапы методики: задание точек измерений; подбор интервала времени регистрации; регламент проведения регистрации путем перемещения двух приборов по площадке или по зданию.

3) На основании полученного экспериментального опыта детально рассмотрены вопросы настройки сейсмической регистрации и тотальной обработка записей. Основу анализа сейсмограмм составляют динамические характеристики волновых полей – пространственное распределение значений амплитуд на собственных частотах колебаний выбранного объекта.

В главе 5 приведены примеры экспериментального применения представленного в диссертации способа на территории г. Архангельска и Архангельской области.

Выбор мест постановки сейсмических станций. Задачей работ является поиск места с наименьшими техногенными помехами на заданной площади в с. Климовское Коношского р-на Архангельской обл., выбор подходящих точек под зданием и вне его на грунте, на удалении 50 м и на 200 м в яме на мысу озера.

Детально рассмотрена методика проведения наблюдений и обработки данных. В результате работ выбрана точка на мысу, т.к. она характеризуется самым низким уровнем дневных шумов, наименьшим различием записей в дневное и ночное время, резким уменьшением техногенной компоненты, в том числе ветровых колебаний от здания. Проведено сравнение спектров микросейсм для выбранной точки и осредненных значений в целом для континента, полученных на поверхности и в штольнях с использованием сейсмологических станций IRIS. Выбранный участок на мысу действительно является одним из немногих тихих мест.

Обследование гражданских и промышленных сооружений различных типов: кирпичных, каркасных, деревянных и железобетонных. Показано, что значения собственных частот различных сооружений лежат в диапазоне от 0,57 до 4,9 Гц (табл. 1). Более высокие значения собственных частот характерны для массивных архитектурных памятников, например, объектов Соловецкого монастыря.

Таблица 1 – Собственные частоты для сооружений различных типов, г.Архангельск

Название сооружения	Типы сооружений:			
	кирпичное	деревянное	каркасное	ж/б
Высотное 24-эт. здание				0,57
Дворец Пионеров	2,3; 2,72; 2,86			
Колокольня Соловецкого монастыря	2,86; 2,99			
ИЭПС УрО РАН, наб. С.Двины, 109	2,72; 2,86			
Дом Культуры		2,58		
ул.Обводный Канал, 69 (жилой дом)			1,9	
ул. Сов.Космонавтов, 120 (жилой дом)			1,9	
ул. Воскресенская, 6 (жилой дом)	1,77			
ул. Ленина, 2 (жилой дом)	1,77; 2,04			
ул. Ленина, 3 (жилой дом)	1,9; 2,02			
ул. Галушина, 5 (жилой дом)			1,63; 1,77	
ул. Галушина, 9 (жилой дом)			1,77; 1,9	
ул. Суфтина, 15 (жилой дом)		4,9		
Автомобильный мост				2,45
Железнодорожный мост				0,81; 1,36
Кирпичный заброшенный завод	1,22			
Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат (колебание труб)	0,27; 0,68			

Эффекты взаимодействия зданий. Явления воздействия сооружений друг на друга при строительстве или устройстве котлованов известны, это статические воздействия. Динамические взаимные влияния зданий практически не изучены. На натуральных объектах (ряд жилых домов) в результате наблюдений, выполненных в разных точках зданий и на поверхности грунта, показано, что грунты являются связующим звеном между сооружениями – они передают колебания с одного объекта на другой. На основании выявленного нами эффекта предложен

рекогносцировочный способ поиска ослабленных зон в сооружениях, заключающийся на просвечивании исследуемого объекта собственной частотой колебаний другого инженерного сооружения.

Использование ветровых колебаний сооружения для мониторинга физических свойств грунтов. Обследовалось жилое здание в разные сезоны (зима 2004 г. и лето 2005 г.). Уровень амплитуд собственных колебаний на горизонтальных компонентах остался прежним, а на вертикальных – изменился почти на два порядка. Собственная частота здания за время исследований не менялась, изменились свойства грунтов – замерзание-оттаивание, т. е. условия «закрепления» здания, что нашло отражение в значениях амплитуд.

Проводилось сравнение спектров мощности для однотипных жилых зданий, построенных в одинаковых и разных грунтовых условиях. Значения собственных частот колебаний сооружений в одинаковых грунтовых условиях совпадают, чего нельзя сказать для зданий, находящихся на разных грунтах. Таким образом, на натуральных примерах показана не только взаимосвязь здания и грунта, но и доказана чувствительность представленного способа к физическим свойствам грунта основания.

Обследование аварийных зданий. *Исследование разрушенного здания.* Обследовался жилой дом в г. Архангельске, где взрывом газа был практически полностью разрушен крайний подъезд. Измерения проводились на грунте вблизи аварийного дома, на первом и девятом этажах. Собственная частота колебания (основной тон) здания – 1,9 Гц. Отмечается присутствие сигнала на данной частоте при регистрации на грунте, что является еще одним подтверждением связующих свойств грунта. Для сравнения было обследовано стоящее рядом неповрежденное здание такого же конструктивного решения и на тех же грунтах. Сравнение спектров мощности колебаний зданий (рис. 3) показывает их хорошее соответствие на горизонтальных компонентах. На вертикальной компоненте пострадавшего здания отсутствует пик, соответствующий собственной частоте колебания. Это свидетельствует о том, что нарушены вертикальные связи строительных конструкций, дом нуждается в укреплении.

Архитектурный памятник Соловецкого монастыря. На примере Белой башни Соловецкого монастыря разработана методика сейсмометрического обследования архитектурных памятников. Мониторинг состояния Белой башни проводился в течение двух полевых сезонов 2004-05 гг.

В соответствии с предложенной схемой проведения обследования в 2004 г. был выявлен ряд нарушений (трещин) в теле Белой башни. Результаты 2005 г. показали, что пики, соответствующие основному тону собственных колебаний башни и более высоким гармоникам, выявленные в 2004 г., не совпадают. В 2004 г. значения собственных частот составляли: 8,9; 17,6; 26,7 Гц, а в 2005 г. – 9,4; 18,8; 28,2 Гц, т.е. наблюдается значительный сдвиг значений собственных частот. В спектрах в 2005 г. присутствует еще один яркий пик на частоте 6,27 Гц, который в 2004 г. не входил в полосу регистрации и наблюдается везде на территории монастыря. Учитывая, что значение $6,27 \text{ Гц} \times N = 50 \text{ Гц}$, $N = 8$ – пик создается местной электростанцией, расположенной неподалеку.

Вторая гармоника собственных колебаний башни 18,8 Гц в 2005 г. совпадает со значением $6,27 \text{ Гц} \times 3 = 18,8 \text{ Гц}$ для 3-ей гармоники вибрации, наведенной от электростанции. Сдвиги собственных частот за время мониторинга составляют: для первой гармоники 0,5 Гц, для второй – в два раза больше, т.е. 1 Гц. Разность в сдвигах указывает на то, что данный эффект не обусловлен аппаратурой. Возможно, тут наблюдается эффект синхронизации колебаний с

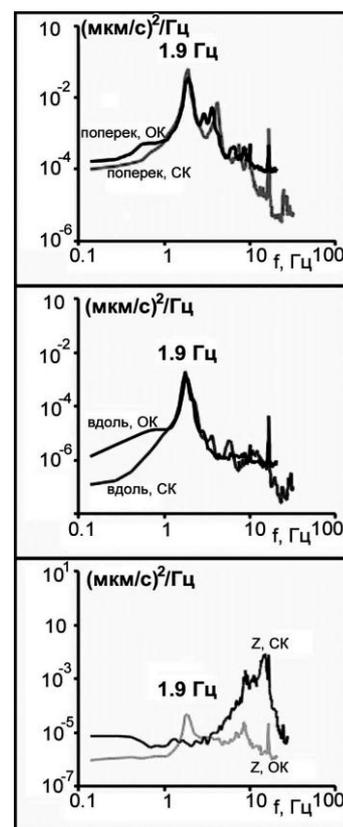


Рисунок 3 – Спектры записей в аварийном жилом доме (СК) и в соседнем целом (ОК) (этот же проект) на 9^{ых} этажах

близкими частотами в нелинейной системе (Николаев А.В., 1987). Существенно, что такое явление может приводить к прогрессирующему разрушению сооружения.

Анализ траекторий движения для каждой точки и каждой частоты удобно представить в виде диаграмм-ромбов (рис. 4). Результаты 2004 г. показали подобие форм диаграмм-ромбов по основному тону колебаний, т.е. конструктивная целостность башни не нарушена. Трещины соответствуют частичным разрушениям, наиболее ослабленное место (по второй и третьей гармонике) – вблизи т. *b* (рис. 4). В 2005 г. наличие нарушений проявляется уже на основной частоте. Совокупность фактов дает возможность предположить, что трещины имеют тенденцию к развитию, причем вблизи т. *b* находятся самые значительные повреждения Белой башни.

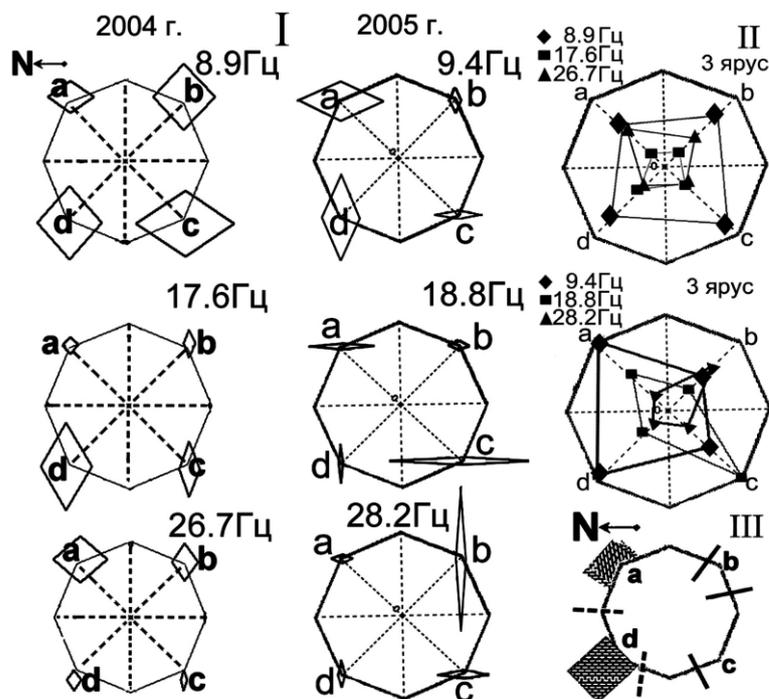


Рисунок 4 – Диаграммы-ромбы (I), построенные на основании полярных диаграмм амплитуд разных мод собственных колебаний башни в горизонтальной плоскости (II) для набора точек и частот, данные 2004 – 2005 гг.; план-схема по результатам обследования состояния Белой башни (III), нанесены трещины – развивающиеся (сплошная линия) и новые (пунктир)

В комплексе с регистрацией колебаний были проведены малоглубинная сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). Схема наблюдений позволяет оценить временные изменения, произошедшие в течение года. На участке соответствующей т. *c* отмечается наибольшее изменение средней скорости, а в т. *b* – наименьшее. Отметим, что т. *c* наиболее близко подходит к автодороге.

Таким образом, анализ экспериментальных данных позволяет выделить следующие наиболее важные факты, свидетельствующие о состоянии башни:

- значительное изменение собственной частоты за год, согласование нового ее значения с частотой техногенной вибрации, воздействующей на сооружение,
- потеря единства характера движений для разных точек башни на основном тоне колебаний,
- изменение грунтовых условий.

Отмеченная динамика изменений указывает на необходимость продолжения мониторинга с привлечением деформометрических измерений с установкой тензометров в ключевых точках и «маяков» на трещинах. Методическим результатом работы является демонстрация чувствительности способа к изменениям в конструкциях, вызванных наведенными колебаниями и изменениями в грунтовых условиях.

Ветровые колебания сооружений в задачах геодинамических исследований. Здания и инженерные сооружения можно использовать в качестве вибраторов для просвечивания

геологической среды. Приведены результаты обследования территории вдоль р. С. Двина (35 км x 10 км) с целью оценки и выбора участка для размещения АТЭС. Анализ ряда карт и дешифровка космоснимков указал на возможность присутствия разлома в пределах обследуемой полосы. В качестве источника сейсмических волн использована система мостовых кранов (собственная частота колебаний 5,2 Гц) – т.е. частота соответствует значениям при структурных исследованиях методом ГСЗ.

Путем анализа поляризованной картины, построения амплитудных кривых, синтетических сейсмограмм показано, что система мостовых кранов является источником преимущественно объемных волн, которые распространяются на значительные расстояния (порядка 15 км), т.е. источник просвечивает значительную часть обследуемой территории.

Обработка материалов точечных площадных наблюдений проводилась по алгоритму гл. 4. Оценка медианных значений для распределения амплитуд на частоте пика для разных точек наблюдений позволила составить пространственную картину распространения сигнала. В результате получена зона поглощения сейсмического сигнала. Форма пятна – достаточно протяженная и узкая полоса, и ее расположение на карте указывает, что полоса совпадает с зоной предполагаемого разлома. Было установлено, что в пределах полосы наблюдается эндогенное сейсмическое излучение, что подтверждает вывод о наличии здесь разлома. Практическим результатом было заключение о необходимости перенесения АТЭС за пределы тектонического нарушения.

Сейсмическое микрорайонирование (СМР) территории г. Архангельска. Стандартные требования к проведению работ по СМР сводятся к необходимости записи сильного землетрясения не менее, чем в трех точках, расположенных в разных грунтовых условиях. Затем точки перемещаются и ждут следующего сильного толчка. Вместо землетрясений среду возбуждают взрывами или вибраторами. Это трудоемкие и дорогостоящие работы, особенно в слабосейсмичных районах. Метод поверхностных волн малоэффективен в городах. В соответствии с предложенным в диссертации способом, вместо землетрясений, взрывов и вибраторов можно использовать колебания высотных сооружений, которые постоянно излучают в среду сейсмический сигнал. Обследуемую территорию можно пройти последовательно по заранее намеченным точкам, с использованием даже одной сейсмической станции типа КБС-2.

В г. Архангельске в качестве сейсмического источника выбрано единственное 24-этажное здание, основной тон собственных колебаний которого 0,57 Гц. После оценки медианных значений распределения амплитуд на частоте пика (A , м/с) для разных точек наблюдений проводилось вычисление ускорения для выбранных точек по формуле $a = 2\pi fA$, где f – частота сигнала, распространяемого от сооружения. Далее следовали схеме работы с опорной точкой с вычислением отношения ускорения к найденному значению ускорения выбранного опорного грунта и, затем, следовало построение карты приращения балльности или ускорений силы тяжести для обследованной территории (Медведев С.В., 1962). Были построены карты сейсмического микрорайонирования с указанием приращения балльности (рис. 5) и ускорений силы тяжести (доли g) (рис. 6) для центральной части г. Архангельска. При выборе точек наблюдений использовалась инженерно-геологическая карта города.

Данный пример показывает, что с использованием микросейсм можно проводить СМР в принципе для любого города и это является еще одним доказательством широких возможностей представленного способа исследования грунтов и инженерных сооружений.

Выводы главы 5. Использование собственных колебаний инженерных сооружений позволяют решать различные задачи:

- обследовать конструктивную целостность зданий и оценивать состояние грунтов,
- картировать особенности геологической среды, в том числе выявлять разрывные нарушения,
- строить карту сейсмического микрорайонирования города.

Заключение. В результате выполненных работ предложен новый эффективный способ исследования инженерно-сейсмических параметров геологической среды и конструктивной целостности инженерных сооружений, характеризующийся экономичностью, технологичностью

и оперативностью в получении результатов измерений. Представленный способ, базирующийся на изучении собственных колебаний зданий и сооружений, пригоден для исследования широкого класса объектов, не нарушает городской среды и жизнедеятельности производственных и жилых сооружений. Кроме того, при разработке способа были получены следующие результаты, имеющие самостоятельное значение:

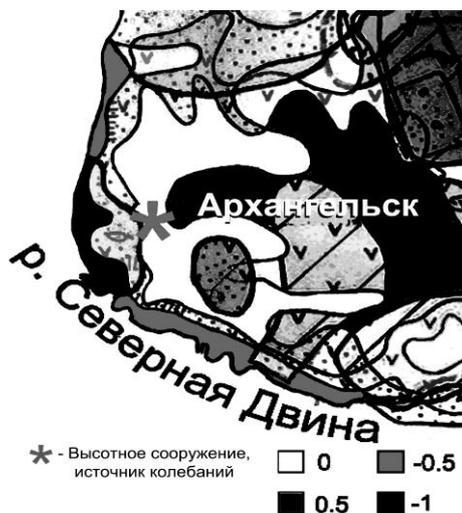


Рисунок 5 – Карта приращения балльности территории г. Архангельска

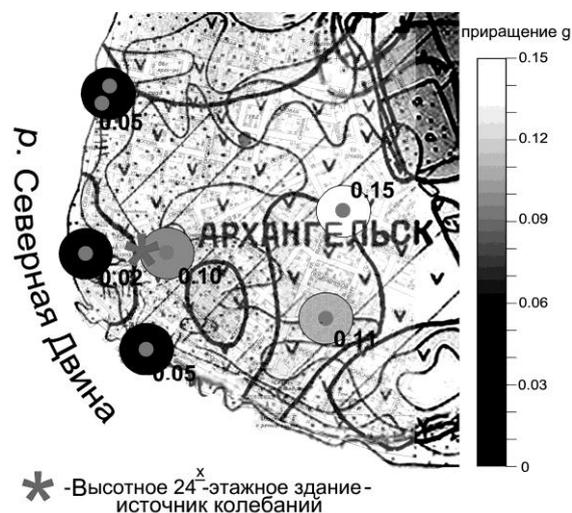


Рисунок 6 – Карта ускорений (в долях g) территории г. Архангельска

1. Разработано техническое задание для нового типа полевой аппаратуры, осуществляющей одновременную запись вариаций атмосферного давления микробарографом и трехкомпонентную регистрацию микросейсм в точке наблюдений, послужившее основой для создания цифровой портативной баро-сейсмической станции (диапазон частот 0,2-40 Гц). Разработаны алгоритмы оперативной обработки результатов, основанные на анализе динамических характеристик волновых полей ветровых колебаний.

2. Представлена методика выбора пространственно-временной схемы наблюдений полей ветровых колебаний и набор регламентов работ для обследования зданий и территорий.

3. Предложена методика обследования конструктивной целостности инженерных сооружений, которая позволяет выявить наиболее ослабленные зоны в исследуемом объекте, а также восстановить пространственно-временную картину динамики объекта. Объекты опробования способа:

- жилые дома в окрестности высотного 24-х этажного здания, в результате чего выделены зоны ослабления конструктивной целостности домов;
- аварийное жилое здание, пострадавшее от взрыва, в результате чего установлено, что нарушены вертикальные связи в конструкции дома;
- архитектурный памятник Соловецкого монастыря – Белая башня, в результате чего выявлены особенности колебаний башни, позволившие выявить области трещиноватости, могущие привести к ее разрушению.

4. Показана связь инженерных сооружений с основаниями и возможность определения состояния грунтов путем проведения мониторинга собственных колебаний сооружений.

5. Установлено, что ветровые колебания инженерных сооружений возбуждают в геологической среде объемные волны, распространяющиеся, в условиях исследованного региона г. Архангельска, на первые десятки километров.

6. Показано, что ветровые колебания раскачивают высокие сооружения, которые становятся постоянно действующими естественными зондирующими источниками, позволяющими реализовать сейсмическое просвечивание геологической среды для изучения ее строения, в том числе для выявления разрывных нарушений. В результате полевых наблюдений получены карты пространственного распределения амплитуд сигналов на частоте собственных колебаний источника, на которых выделяется зона повышенного поглощения сейсмической

энергии. По направлению и местоположению зона совпадает с активным разломом, существование которого предполагается геологами.

7. С использованием ветровых колебаний зданий построена карта приращений балльности и силы тяжести, на основании чего составлена карта СМР центральной части г. Архангельска.

Таким образом, представлен новый способ, позволяющий использовать ветровые колебания зданий для исследований инженерно-сейсмических параметров и конструктивной целостности инженерных сооружений.

Публикации по теме диссертации:

Патент:

1. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Хорев В.С., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения. RU. № 2242033 С1. Приоритет 12.02.2004.

Монографии:

1. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Применение микросейсмических технологий для исследования геологической среды и конструктивной целостности зданий // Землетрясения и микросейсмизм в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. А.А. Маловичко, Н.В. Шарова, Ю.К. Щукина. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007 (в печати).

2. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Микросейсмические исследования на платформенных территориях // Монография по проекту Программы № 13 «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы» под ред. вице президента Н.П. Лаверова. 2007 (в печати).

Статьи, опубликованные в зарубежных журналах, рецензируемых отечественных изданиях:

1. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания // ДАН. Т. 402. № 2. С. 255-259.

2. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием сейсмической нанотехнологии // ДАН, 2005. Т. 405. № 4. С. 533-538.

3. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Применение наносейсмических технологий для исследования геологической среды и конструктивной целостности сооружений // Геодинамика и геоэкология высокогорных регионов в XXI веке: III междунар. симпозиум. Вестник КРСУ. Киргизия. Бишкек, 2006. С. 5-23.

4. Yudakhin F., Kapustian N., Shahova E., Antonovskaya G. Research of geodynamic processes on natural model of block medium // EGU – General Assembly. Vienna. Austria, 24-29 April 2006. CD-Rom.

Публикации в сборниках и материалах конференций:

1. Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакин Б.Г. Опыт обследования зданий и исторических сооружений с использованием сейсмических методик // VI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. С. 9-13.

2. Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакин Б.Г. Сейсмометрический мониторинг состояния архитектурного памятника Соловецкого монастыря // Современные проблемы геофизики. VII Уральская молодеж. науч. школа по геофизике. Сб. материалов. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С. 3-7.

3. Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Капустян Н.К. Новый способ детального сейсмометрического обследования среды при размещении объектов особой важности // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Ч. 1. Апатиты: КНЦ РАН, 2004. С. 201-208.

4. Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Капустян Н.К. Сейсмический мониторинг городской среды Архангельска с использованием динамики зданий и сооружений // Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах: Матер. междунар. конф. Архангельск: АГТУ, 2003. С. 197-201.

5. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Использование микросейсм для сейсмического микрорайонирования городов // Академическая наука и ее роль в развитии производительных сил в северных регионах России: всероссийская конфер. с междунар. участием. Архангельск, 2006. CD-Rom.

6. Юдахин Ф.Н., Шахова Е.В., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К. Изучение разрывных нарушений на платформенных территориях (на примере Архангельской области) // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сб. трудов VII геофизических чтений им. В.В. Федынского. М.: Научный мир, 2006. С. 290-295.