

На правах рукописи

ШАХОВА Евгения Васильевна

**ЭКСПРЕСС-МЕТОДИКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
ПЛАТФОРМЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ
(НА ПРИМЕРЕ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ)**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

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

- Научный руководитель:** член-корреспондент РАН,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор
Феликс Николаевич Юдахин
- Научный консультант:** доктор физико-математических наук,
Учреждение РАН Институт физики
Земли РАН
Наталья Константиновна Капустян
- Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,
Учреждение РАН Институт физики
Земли РАН
Алексей Леонидович Собисевич
- кандидат физико-математических наук
Кольского филиала Геофизической
службы РАН
Елена Олеговна Кременецкая
- Ведущая организация:** **Институт геологии Карельского
научного центра РАН**

Защита состоится **18 декабря** 2008 г. в **11 часов** на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 в Учреждении Российской академии наук в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН по адресу: 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

Автореферат разослан «.....» ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



О.В. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Проблема безопасности при размещении важных промышленных объектов на платформенных территориях требует детальных геолого-геофизических исследований, нацеленных на слежение за геодинамическими процессами в среде. В частности, в Архангельской области действуют и проектируются: АЭС, протяженные трассы нефте- и газопроводов, хранилища радиоактивных отходов, космодром «Плесецк», центр атомного судостроения и пр. Традиционно наиболее информативными для оценки активности являются сейсмические методы, которые должны быть нацелены на выявление, в первую очередь, неотектонических активных разрывных нарушений. В труднодоступных районах, к которым относится значительная часть Архангельской области, выявление разломов с помощью детальных сейсморазведочных площадных наблюдений представляет значительную экономическую и технологическую проблему. Такие работы должны предваряться рекогносцировочными исследованиями с оперативным получением результатов, т.е. с применением экспресс-методик сейсмического обследования территорий. Существенно, что разработка таких методик начата относительно недавно, в мировой практике наблюдения представлены в основном тремя модификациями, основанными на анализе поле микросейсм – поиске микрособытий (методика ИДГ РАН), статистическом описании потоков эндогенных микроимпульсов (ИФЗ РАН-ИЭПС УрО РАН) и анализе поверхностных волн (*Nakamura et al., 1989; Schapira, 1994; Zaslavsky, 2000; Горбатиков и др., 2007*).

Следует отметить, что даже очень детальные структурные сейсмические исследования (3D-сейсморазведка и пр.) пока не позволяют судить о степени активности выделяемых ими разломов. Тут надо анализировать эндогенное сейсмическое излучение среды, опираясь на опыт сейсмологии. Сложность задачи состоит в том, что для платформенных областей признаки сейсмической активности разрывных нарушений изучены недостаточно полно, и, по существу, нет четких критериев их проявления в сейсмическом волновом поле. В связи с этим, начальным этапом исследований является обобщение современных представлений о сейсмических проявлениях на разрывных нарушениях платформ; это, по существу, самостоятельная задача, актуальная для обследования территорий.

Рекогносцировка сейсмическим методом требует создания мобильных и точечных наблюдений с возможностью настройки регистрации непосредственно в полевых условиях. Важными факторами, определяющими, с одной стороны, экономическую и технологическую стороны работ, а с другой – существенными для использования в труднодоступных, либо природоохраняемых районах является отказ от специальных геофизических излучателей и построение наблюдений на основе имеющихся сейсмических источников естественного и техногенного генезиса.

Представленная в работе экспресс-методика основана на комплексировании активных и пассивных наблюдений. Для активных экспериментов – сейсмических просвечиваний среды, в качестве техногенного источника сейсмических колебаний в диссертации предложено использовать резонансные частоты высоких инженерных сооружений, возникающие при раскачивании их под действием ветра. Пассивные наблюдения строятся на выделение эндогенных микрособытий из фона микросейсм. Существенно, что основой методики являются микросейсм, это позволяет вести экспресс-обследования практически везде и в любое время. Все это обосновывает актуальность разработки новой методики экспериментальных сейсмических исследований.

Объект исследования: особенности поля микросейсм среднечастотного диапазона (0,5-30 Гц), связанные с неоднородностями в верхней части земной коры, в том числе с разрывными нарушениями.

Цель работы – создание экономичной, технологичной и экологически безопасной экспериментальной методики, позволяющей оперативно обследовать территории для выявления ослабленных зон и разрывных нарушений в осадочном чехле и верхах фундамента и оценки их микросейсмической активности.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Обобщение современных представлений о сейсмических проявлениях разрывных нарушений в платформенных районах.
2. Разработка пространственно-временных схем сейсмических наблюдений и выработка основных требований к аппаратуре регистрации.

3. Создание комплекса алгоритмов обработки экспериментальных записей микросейсм на основе оценки параметров эндогенного сейсмического излучения и просвечивания среды техногенными сейсмическими сигналами.

4. Тестирование методики на модельных примерах и натуральных объектах.

5. Опробование и наладка предложенной методики при обследовании территории предполагаемого строительства важного объекта вблизи г. Архангельска.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Предложенная экспресс-методика технологична, оперативна и применима в самых разнообразных условиях на местности. Использование в качестве сейсмических излучателей ветровых колебаний инженерных сооружений делает методику очень экономичной, поскольку источник колебаний – бесплатный и действует всегда. Применение портативной аппаратуры позволяет обследовать труднодоступные районы и работать на охраняемых природных территориях без нанесения им ущерба. Предложенный комплекс алгоритмов обработки материалов полевых наблюдений позволяет оперативно получать результаты работ в поле в точке наблюдений, что существенно для возможности изменений, т.е. гибкости системы наблюдений.

С применением предложенной методики проведено сейсмическое обследование площадки намечаемого строительства АЭС на территории Архангельской промышленной агломерации. Выявлена зона поглощения сейсмических сигналов северо-западного простирания, совпавшая с положением активного разлома, предполагаемого по геологическим данным. Обнаружение эндогенного излучения из этой зоны позволило сделать вывод о том, что местоположение АЭС должно быть скорректировано. Результаты работ были переданы Минатомэнерго для принятия решений.

Научная новизна работы.

1. Проведено обобщение и систематизация представлений о микросейсмической активности разрывных нарушений на платформах, на основании чего предложен ряд параметров, определяемых по экспериментальным записям микросейсм и характеризующих меру геодинамической активности разрывов. Это – распределение мощности потока микроимпульсов, анизотропия в широтном и меридиональном направлениях, преобладающая частота эндогенного излучения.

2. На экспериментальных данных, численных и натуральных моделях разработаны приемы использования когерентно-временного анализа трехкомпонентных (X, Y, Z) записей микросейсм для оценки параметров, характеризующих разрывное нарушение.

3. Впервые проведены площадные микросейсмические наблюдения с одновременной интерпретацией природной и техногенной компонент микросейсм.

4. По сейсмическим данным выявлены аномальные зоны, соответствующие разрывам в верхах земной коры.

5. Предложен вариант экспресс-методики, позволяющий провести рекогносцировку крупного участка территории с выявлением разрывного нарушения и уточнения участков для детальных работ.

Обоснованность результатов определяется использованием калиброванной аппаратуры, подтверждается численным и натурным моделированием и согласованностью результатов, полученных разными методами.

Защищаемые положения:

1. Предложена сейсмометрическая экспресс-методика для рекогносцировочного обследования платформенных территорий с целью выявления разрывных нарушений, основанная на регистрации микросейсм и совместной интерпретации их составляющих разной природы. Частью экспресс-методики является использование в качестве источника собственных колебаний выступающих в рельефе сооружений, возбуждаемых атмосферными пульсациями. Это позволяет осуществлять сейсмическое просвечивание среды с выявлением зон повышенного поглощения сигнала, которые могут отождествляться с тектоническими нарушениями.

2. Экспериментально установлено, что разломы на слабоактивных платформенных территориях постоянно излучают сейсмическую энергию в виде потоков микроимпульсов с характерными амплитудами смещений от долей нанометров и выше и в частотном диапазоне единицы-десятки Герц, что может быть использовано для оценки сейсмического режима изучаемых районов. Ядром экспресс-методики является выделение эндогенной компоненты из микросейсм и

интерпретация, основанная на проведении статистического анализа микроимпульсов, математического и натурного моделирования.

3. Практическое использование предложенной экспресс-методики осуществлено на территории вблизи г. Архангельска, в результате чего было выявлено разрывное нарушение и проведена оценка геодинамической активности различных его участков.

Личный вклад присутствует на всех этапах работы, особенно при проведении полевых наблюдений и обработке данных.

Апробация. Работа над диссертацией была связана с выполнением исследований по плановой теме Института экологических проблем Севера УрО РАН: «Изучение полей напряжений и взаимодействия геосфер по геофизическим и сейсмическим данным на Европейском Севере», № Госрегистрации 01.200.1 15370.

По результатам работы получен патент на изобретение «Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения», № 2242033, соавтором которого является диссертант. Результаты работы доложены на Всероссийских и Международных конференциях в гг. Архангельске (2003, 2004, 2008 гг.), Москве (2003, 2005 гг.), Сыктывкаре (2005 г.), Петрозаводске (2008 г.), Молодежных Международных конференциях в г. Архангельске (2003, 2008 г.), Уральских молодежных научных школах по геофизике в гг. Екатеринбург (2004 г.) и Пермь (2005 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 28 статей, в том числе 1 монография в соавторстве, 3 статьи из списка ВАК.

Структура работы: введение, 4 главы, 97 рисунков, 9 таблиц, заключение, 1 приложение. Объем работы 188 страниц. Список литературы включает 138 наименований.

Автор глубоко благодарен своему научному руководителю – члену-корреспонденту РАН, доктору геол.-мин. наук, профессору Феликсу Николаевичу Юдахину за руководство, постоянную поддержку и внимание к работе, что способствовало её завершению. Особую признательность автор выражает доктору физ.-мат. наук Наталии Константиновне Капустян за научные консультации, личное участие в полевых работах и помощь в проведении исследований. За творческое общение и дискуссии автор благодарен д.г.-м.н. В.И. Макарову, д.г.-м.н. Ю.К. Щукину, д.г.-м.н. В.С. Дружинину, д.г.-м.н. Ю.Г. Кутинову, д.г.-м.н. Г.П. Киселеву, к.г.-м.н. З.Б. Чистовой, к.т.н. Г.Н. Антоновской. За помощь в проведении полевых исследований диссертант признателен к.т.н. А.И. Мошкунову, Ф.Ш. Исламнурову, К.А. Мошкунову, И.М. Басакиной и сотрудникам СГИАПМЗ Л.А. Петровской и А.Н. Соболеву.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 рассмотрены особенности геологического строения территории и волновое поле микросейсм. Приведены физико-географические, геологические, тектонические, стратиграфические, сейсмические характеристики района. По геолого-геофизическим данным докембрийский фундамент Восточно-Европейской платформы и ее осадочный покров принадлежат двум крупным геоблокам – Карело-Кольскому и Белорусско-Балтийскому северо-западного простиранья, оформившихся еще в позднем архее (*Добрынина, 1992; Мальшев, 1986*). Геоблоки разделены глубоко проникающими межблоковыми швами, в верхней части которых образуются прогибы различного генезиса. Граница геоблоков представляет зону линейных неоднородностей, отражающуюся в гравитационном и магнитном полях линейно вытянутыми аномалиями (*Юдахин и др., 2003*). Их пересекают почти под прямым углом более молодые по отношению к геоблокам наложенные активизированные структуры или разломно-блоковые зоны: Балтийско-Мезенская, протяженностью свыше 1200 км и Хибинская – свыше 900 км.

К востоку от Балтийского щита (БЩ) и по обе стороны Тиманско-Канинской полосы архейские и протерозойские породы глубоко погружены и перекрыты мощной толщей осадочных пород разного возраста. Пласты осадочных пород залегают с пологим падением на восток и юго-восток от БЩ, древние постепенно перекрываются более молодыми. Мощность отложений осадочного чехла от 4,5 до 10 км (*Добрынина, 1992*). В составе осадочного чехла Юго-Восточного Беломорья присутствуют образования среднего и верхнего рифея, верхнего венда, палеозоя, мезозоя и кайнозоя.

С учетом характера сейсмотектонических особенностей по характеру проявления сейсмичности территория Архангельской области условно разделяют на три района (*Юдахин,*

2001): Беломорско-Двинской, Тимано-Печорский, Новоземельско-Пайхойский. Большая часть сейсмических событий сконцентрирована в Беломорско-Двинском районе. Согласно историческим и инструментальным данным, в Архангельской области, включая архипелаг Новая Земля, за период с 1467 по 1997 г. проявилось более 125 землетрясений с магнитудой от 1,0 до 6,3 и глубинами очагов 0-25 км. Среди них самые значительные землетрясения – в районе Архангельска и в непосредственной близости от него в акваториях Двинской губы и горла Белого моря (Юдахин, Французова, 2001).

Изучение серии карт (структуры фундамента Юго-Восточного Беломорья (Станковский, 1986), карты эпицентров землетрясений и главных разломов на территории Архангельской области (Юдахин, 2002), активных разломов северной части Восточно-Европейской платформы (Трифонов, 1996), фрагмента карты новейшей тектоники северо-западного региона, схемы размещения основных разрывных структур в восточной части Балтийского щита и на северо-западе Русской платформы (Савицкий, Афанасьева, 1986), гравиметрической карты России и карты аномального магнитного поля (ΔT)_a России и прилегающих акваторий (Петров и др., 2004)) показывает, что Архангельская область расположена в сложной геолого-геофизической обстановке, на геодинамически активной территории, в верхах земной коры которой выделяются разрывные нарушения. Как следует из выше перечисленных карт, доминирующими направлениями разрывных нарушений являются северо-западные и пересекающие их почти под прямым углом – северо-восточные. Эти нарушения, уверенно картируемые в пределах БЩ, предположительно можно продлить на изучаемую площадь, используя существующие геологические данные и результаты наблюдений на редкой сети сейморазведочных профилей. Инструментальная информация однозначно свидетельствующая о местоположении разломов и степени их активности на исследуемой территории пока нет.

Приуроченность землетрясений к участкам литосферы, расчлененным трещинами и разломами хорошо известна. Связь сейсмичности с разломами на территориях с яркой сейсмической активностью, хорошо изучена и доказана (Бабаев, Мирзоев, 1976; Вишневский и др., 1999; Садовский и др., 1981, 1987; Юдахин, 2002 и др.). В настоящее время для характеристики активности разрывных нарушений традиционные данные о землетрясениях, получаемых сетями сейсмических станций, стали дополняться с одной стороны, геологическими палеосейсмическими исследованиями (Рогожин, Захарова, 2002), а с другой – микросейсмическими наблюдениями (Рыкунов, Смирнов, 1986, 1987, 1996; Кочарян, Спивак, 2003). Такой подход, использующий микросейсмы, может быть применен и на платформах.

Для того чтобы проиллюстрировать новые возможности, удобно использовать эмпирический закон Ципфа-Парето (Zipf, 1949; Pareto, 1965), описывающий свойства иерархических систем и, связывающий частоту появления события f_r с его рангом r (номером в упорядоченном списке) $f_r = \text{Const}/r^\gamma$, где обычно $\gamma \leq 1$. График повторяемости сейсмических событий (закон Гутенберга-Рихтера), отражающий иерархичность геологической среды и проявлений сейсмичности, является приложением закона Ципфа-Парето к описанию сейсмического режима; в данном случае рангом является энергетический класс или магнитуда. Данные сейсмологии, получаемые в течение десятков лет, позволяют построить центральную часть графика, соответствующую ощутимым и сильным землетрясениям. Другой край графика, соответствующий слабым и очень слабым событиям, не менее важен, т.к. он отражает сейсмическое излучение микроуровней структурной иерархии. Привлечение распределений микрособытий к статистическому анализу каталогов дает возможность увеличить надежность построения графика повторяемости. Кроме того, это одна из возможностей проведения на статистическом уровне очистки каталога от событий несейсмической природы (как искусственных, так и природных, например, морозобойных процессов). Не менее важно и то, что использование микрособытий для оценки наклона графиков распределений требует существенно меньшее время (от часов до месяцев) регистрации в отличие от многолетних сейсмологических наблюдений. За этот выигрыш во времени приходится расплачиваться проигрышем в пространственном охвате территории, который может быть восполнен либо сгущением сети наблюдений, либо подключением геолого-геофизических методов выделения ключевых объектов геодинамики, например, разрывных нарушений.

Приведенный краткий обзор взаимосвязи геодинамической активности разрывных нарушений с сейсмическим режимом показывает основные факты, лежащие в основе представлений, на

которых строится диссертационная работа – существуют два фундаментальных свойства земной коры:

1) горные породы в условиях естественного залегания излучают сейсмическую энергию под действие разных факторов – природных и техногенных; излучаемая энергия лежит в широком диапазоне значений магнитуд, в том числе отрицательных, распределение которых описывается фундаментальным эмпирическим законом Ципфа-Парето (Гутенберга-Рихтера); гистограмма энергий событий района в двойном логарифмическом масштабе – прямая линия, по наклону которой судят о сейсмической активности территории,

2) приуроченность землетрясений к разрывным нарушениям разного ранга или иным дефектам среды, представляющим собой концентраторы напряжений.

В главе приводится обзор представлений об особенностях сейсмического излучения разломов на платформах. Состояние исследования разрывных нарушений на платформенных территориях пока еще не дает возможности понять, какая из моделей является предпочтительной в нашем случае. По-видимому, на разных стадиях деформирования действует несколько процессов и комбинация моделей. Существенно, что в любом случае перемещение блоков с зацеплением бортов вызывает сейсмическое излучение. Приведены особенности графиков распределения энергий излучения, по которым в конкретном случае есть шанс понять, какая из моделей подходит здесь лучшим образом. Кроме того, даны примеры регистрации микрособытий с соотношением сигнал-помеха как $S/N > 1$, так и $S/N < 1$ при явном наличии триггерного внешнего воздействия. Это экспериментально обосновывает представление о том, что эндогенное сейсмическое излучение, соответствующее амплитудам смещения в единицы-доли нанометров, «встраивается» в иерархию сейсмичности. Этот вывод хорошо согласуется с теоретической оценкой, сделанной С.Л. Юнгой для минимального землетрясений $M \geq -6$ (Юнга, 1999).

Выводы главы 1. Детальные сейсмометрические наблюдения, проведенные в последние годы на платформе, позволяют отметить ряд черт, характерных для эндогенного сейсмического излучения земной коры платформенных территорий:

1. Факт присутствия местных микрособытий – «нормальное» явление для сейсмического поля платформ, сейсмические импульсы могут излучаться как из участков среды вблизи разрывов, так и из ненарушенных целиковых массивов. Степень геодинамической активности среды определяется количеством событий в единицу времени и их энергией, связь представлена в виде графика повторяемости для ощутимых событий и распределения интенсивности излучения для микрособытий.

2. Записи микрособытий могут быть представлены как короткими импульсами с крутым фронтом вступлений, так и достаточно длительным цугом сложной формы, в пределе – потоком микрособытий.

3. Напряженно-деформированное состояние среды для платформенных областей таково, что сравнительно слабые внешние воздействия могут служить триггером эндогенного сейсмического излучения, высвобождающего энергию в виде микроимпульсов или увеличения уровня или ритма всплесков сейсмических шумов среднечастотного диапазона (явления типа сейсмической эмиссии). Существенно, что таким свойством обладают преимущественно разрывные нарушения, активные по геолого-геодезическим оценкам.

4. При больших скоростях деформации материала или при растрескивании на разных иерархических структурных уровнях получаем аномальный «горбатый» вид графика распределения интенсивности излучения, свидетельствующий о постоянном излучении энергии средой.

5. Микрособытия с соотношением сигнал-помеха $S/N < 1$ наблюдаемы экспериментально с применением статистических оценок и анализа динамических характеристик трехкомпонентных записей микросейсм в точке.

Глава 2 посвящена аппаратуре и методике наблюдений микросейсм при экспресс-обследованиях территории. На основании опыта проведения наблюдений сформулированы **требования к аппаратуре для обследования разрывных нарушений на платформенных территориях:**

1) количество регистрирующих каналов от 4 до 10, 2) динамический диапазон для регистрации микросейсм (при настройке в точке) – от 16 и более разрядов АЦП, может быть меньше, чем для сейсмологических наблюдений (*Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР, 1975*), 3) обеспечение возможности настройки параметров регистрации в поле

(подбор усиления, фильтрации, просмотр пробы записи, расчет спектра) и предварительной оперативной обработки с использованием notebook, 4) частотный диапазон от 0,2-0,5 Гц до 20-30 Гц, иногда возможен сдвиг диапазона от 5 до 60 Гц. Последнее эффективно при наблюдениях на разрывных нарушениях кристаллического фундамента, выходящего к дневной поверхности (Адушкин и др., 2004), 5) длительность непрерывной записи – до нескольких часов, определяется требованиями получения надежных оценок при статистической обработке (расчет спектров и выделение в них тонких линий, спектрально- и когерентно- временного анализа), 6) пространственно-временная привязка точки – использование GPS; для микросейсмических наблюдений, основанных на статистических оценках (спектрах, когерентности) может быть достаточно точности компьютерных часов, 7) габариты и вес определяются в основном сейсмометрами и источниками питания, сами станции при современной элементной базе довольно миниатюрны, 8) температурный режим определяется требованиями компьютера (notebook). На основе требований по нашему техзаданию была разработано несколько модификаций портативной цифровой баро-сейсмической станции КБС-2 для микросейсмических наблюдений в задачах микрорайонирования территорий, в том числе поиска разрывных нарушений и выбора мест установки сейсмических станций (*Отчет о научно-исследовательской работе...*, 2005). Допустимо применение разных типов датчиков: сейсмометров С-5-С, СМ-3 и СМ-3КВ, что позволяет регистрировать в точке 3 компоненты вектора скорости смещений. Сейсмометры СМ-3КВ и СМ-3 обладают высокой чувствительностью, они нами и были выбраны. Сейсмометры должны быть калиброваны на виброплатформе, что позволяет пересчитать сигналы в абсолютные уровни скоростей смещений или ускорений.

Схемы экспериментов и способы обработки данных. В главе представлен обзор различных методик наблюдения микросейсм, но в соответствии с требованиями экспресс-обследования остановимся на малоканальных наблюдениях.

Метод ИДГ РАН – Метод релаксационного контроля массивов горных пород разрабатывается в ИДГ РАН с конца 80-х годов. Выполняемые сейсмические исследования, по существу, являются продолжением сейсмологического подхода, но в область слабых импульсных сигналов – не намного превосходящих фон. Цель наблюдений – выявление в пространстве участков среды, излучающих сигналы, и оценка сбрасываемых напряжений; во времени – хода энерговыделения. Это определяет схему наблюдений – расстановки в виде микрогруппы для локации очагов, основа обработки – импульсы, выделяемые на записи. Метод основан на исследовании характеристик сейсмических микроколебаний (шумов) в полосе частот 0,5-40 Гц, наблюдаемых на поверхности (Спивак, 1994; Спивак и др., 1995, 1997). Амплитуды регулярно наблюдаемых ИМК колеблются в пределах 0,1-5 мкм/с. Наблюдения в виде набора коротких сеансов (15-30 мин) с интервалами примерно в 2 часа, общая длительность регистрации на каждом участке до 3 суток (Адушкин и др., 2004). Важными достоинствами разрабатываемого в ИДГ РАН метода являются его мобильность и способность оценивать современную (текущую) активность разрывных нарушений.

Чувствительность такой группы разная для далеких и близких событий – под группой доступны наблюдения микроимпульсов, с ростом расстояния энергетический класс событий увеличивается. Таким образом, получаемая характеристика сейсмического режима, во-первых, соответствует локальному участку территории, во-вторых, в значительной степени зависит от места постановки группы, как правило, в районе разрывных нарушений. Структуры, не выявленные по геологическим данным, имеют мало шансов быть «замеченными» по сейсмическим записям. Кроме того, группа ведет регистрацию кусочно-непрерывно в течение нескольких суток. Такая временная схема также создает определенные ограничения, основным является малое число событий, не позволяющее оперировать со статистическими характеристиками сейсмического режима.

Метод ИФЗ РАН - ИЭПС УрО РАН. В методике анализа микросейсм, идея которой была предложена в ИФЗ РАН (Володин и др., 1985; Капустян и др., 2002; Капустян, 2001) и которая успешно развивается нами в настоящее время в ИЭПС УрО РАН (Юдахин и др., 2005; Юдахин и др., 2006; Юдахин и др., 2007; Шахова, 2007), делается упор на динамические характеристики (частотный состав, распределения интенсивности). Методика основана на анализе записи в целом – без разделения ее визуальным интерпретатором на сигналы и фоновую части. Отделение информации от шума производится путем анализа степени когерентности частотных компонент излучения, приходящих с разных азимутов. Сейсмометрические наблюдения проводятся в точке

одновременно тремя компонентами – вертикальной (Z) и двумя горизонтальными (север-юг N-S, восток-запад E-W).

Достоинством метода является, во-первых, его чувствительность к практически любому, даже очень слабому излучению (слабее помех). Во-вторых, выявляются сигналы, без резких фронтов вступлений, т.е. имеющие плавное «включение». Также преимущество данной методики заключается в том, что за сравнительно короткий полевой сезон перемещением точки регистрации можно провести исследование на значительной по площади территории. Недостаток методики – плохая локация местоположения источника. В этой части данный подход хорошо сочетается с методикой ИДГ РАН.

Методика низкочастотного микросейсмического зондирования. Новый подход к исследованию геологической среды на основе использования фонового микросейсмического поля в диапазоне низких частот разрабатывается в настоящее время А.В. Горбатиковым с коллективом авторов (*Горбатиков и др., 2007, 2008*). Данная методика базируется на анализе пространственного распределения амплитуд вертикальной составляющей микросейсмического поля для всех частот спектра в допущении, что вертикальная компонента поля для частот в диапазоне 0,02-1,0 Гц в основном определяется вкладом фундаментальной моды поверхностных волн Рэлеевского типа, которые реагируют на заглубленную и локализованную по вертикали и горизонтали неоднородность.

Вторая методика была принята за основу наблюдений проведенных нами в различных районах Архангельской области. При этом проводились специальные эксперименты, которые позволили обосновать методику выбора пространственно-временной схемы наблюдений микросейсм для выявления геодинамической активности разрывных нарушений на платформенных территориях:

Пространственные размеры системы наблюдений и схема расположения точек определяется, в первую очередь, размерами исследуемой площади. Немаловажными являются вопросы: имеющееся количество регистрирующих станций, сроки проведения работ, погодные условия, доступность точки и пр. Исходя из совокупности всех этих соображений, назначают расположения точек измерений, в которых устанавливают сейсмометры. Местоположение точек измерения на участке территории задают по сетке линий профилей, секущих площадку в продольном и поперечном направлениях. Плотность профилей определяется размерами площадки, характерными размерами разрывного нарушения; положения профилей зависит от доступности площадки для измерений. Точки могут быть заданы неравномерно. Расстояние между точками при просвечивании среды определяется дальностью регистрации, зависящей от типа волн, соотношением сигнал-помеха, стабильностью сигнала и возможностями его накопления. Для выявления источников эндогенного излучения при выборе расстояния между точками следует задаваться радиусом чувствительности методики $R \approx Q\lambda$ (*Лутиков, 1992*), где Q – добротность среды, λ – длина волны. Для набора параметров для различных горных пород и предполагаемых частот эндогенного излучения 5-20 Гц нами был рассчитан радиус чувствительности микросейсмических наблюдений. В нашем случае принят разнос точек регистрации – 3-5 км.

Полоса частот сейсмометрической регистрации f – от 0,5 Гц и выше. Нижний край диапазона определяется доступным типом сейсмометров (желательно работать с СМ-3 или их аналогами). Верхняя граница диапазона частот подбирается так, чтобы получить характерную длину волны λ сейсмических колебаний сопоставимую с r , где r – характерный размер ширины разрывного нарушения. Для широкого диапазона типов грунтов скорость Р-волн V – от 500 до 2000 м/с, для полосы частот со средним значением $F=10-50$ Гц, получаем $\lambda=V/F=10-200$ м. Таким образом, частотный диапазон от 0,5-100 Гц подходит для зон разного размера – от крупных разломов с характерными размерами нарушенности r в сотни метров до мелких зон в единицы метров, важных для оценки состояния основания сооружений различного размера и назначения – от зданий до комплексов АЭС.

Подбор длительности регистрации t осуществляют так, чтобы она заведомо превышала характерный период пульсаций атмосферного давления $T_{атм}$, т.е. при $T_{атм}=1$ мин (спектр Ван-дер-Ховена (*Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра, 1980*)), $t=1-2$ часа. Такой выбор интервала регистрации дает достаточное количество определений получения для средних значений амплитуд монохроматической компоненты просвечивающего среду сейсмического сигнала.

Уровни сейсмической регистрации – наблюдения настраивают на величины, характерные для микросейсмического фона естественного и техногенного происхождения. В зависимости от точки наблюдений это уровни: в городах и пригородах $1-100 \text{ (мкм/с)}^2/\text{Гц}$, в прочих местах в зависимости от характера антропогенной деятельности – от 1 до $10^{-4} \text{ (мкм/с)}^2/\text{Гц}$.

Производство наблюдений. В каждой точке – по трем взаимно ортогональным координатам. Сейсмическую регистрацию ведут одновременно, по крайней мере, в двух заданных точках измерений, последовательно проходя все точки площадки, причем одна из точек является общей (корреляционной). Таким образом, каждый акт измерений производится по схеме – одна станция остается на месте, другая перемещается по сетке намеченных точек. Использование одной регистрирующей станции возможно в следующих случаях: поставлена задача поиска источника постоянно действующего сейсмического излучения или в задачах просвечивания среды площадки техногенными сигналами. Допустимо также вести одноточечные наблюдения для небольших площадок, которые можно отработать за 1-2 дня, без явных изменяющихся во времени источниках помех и при сходных погодных условиях; используется относительное постоянство микросейсм во времени.

Схема наблюдений для обследования территории в Архангельской области – площадка в виде полосы с размерами примерно $50 \times 20 \text{ км}$ (результаты работ изложены в главе 4). Была задана сетка точек сейсмометрических измерений в зоне предполагаемого разлома и вне его (рис. 1). Учитывая болотистую местность, точки расположены вблизи автодорог, на окраинах поселков, на неэксплуатируемых промышленных территориях. Подбирались места, имеющие хорошие постаменты для сейсмометров – бетонные плиты, мощения, пустые летом силосные хранилища и пр., вплоть до павильонов автобусных остановок. В тех случаях, когда постаменты найти не удавалось, сейсмометры устанавливались в специально вырытой яме с утрамбованным дном.

Полоса частот, информативных для поиска разлома, была принята $0,5-20 \text{ Гц}$, верхний предел ограничен достаточно высоким уровнем техногенных помех в доступных для измерения точках. Диапазон рассчитан на регистрацию колебаний, возникающих при ветровых воздействиях на систему порталных кранов (частоты $5,2$ и $10,4 \text{ Гц}$) и на эндогенное излучение в диапазоне $10-20 \text{ Гц}$ (Юдахин, Капустян, 2004). Таким образом, $f=10 \text{ Гц}$, длина волны λ – около 100 м , характерный размер r может варьироваться в пределах от 500 м до 2 км , т.е. структуры такого размера будут хорошо разрешимы с принятой длиной волны.

Полевые наблюдения велись одновременно двумя станциями. В т. 30 (рис. 1) проводились с использованием обеих станций специальные эксперименты для подбора расстояния между соседними точками. Одна станция покоилась, другая перемещалась на удаления от первой в $100, 200 \text{ м}$, 1 и 2 км . Сопоставлялись спектры мощности, анализировался характер когерентно- (КВАН) и спектрально-временных (СВАН) диаграмм. Таким способом параллельно с теоретической оценкой допустимо подбирать расстояние для получения независимых волновых полей.

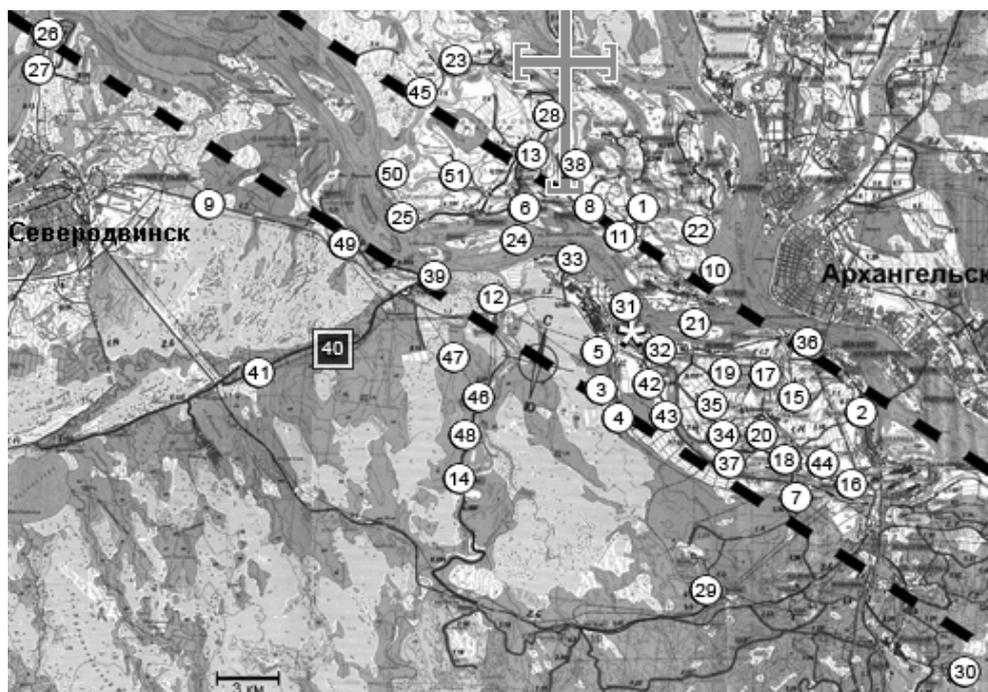


Рисунок 1 – Карта-схема точек регистрации микросейсм: кружки – пункты наблюдения, пунктирная линия – предполагаемое положение разлома по геологическим данным, звезда – местоположение системы порталных кранов, квадрат – местоположение планируемой АЭС, крест – местоположение (с учетом точности определения) эпицентра землетрясения 22 октября 2005 г. с $M=2,8$, $h=2 \text{ км}$ ($\varphi=64,63^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$, $\lambda=40,32^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$)

Расстояние между соседними точками задавалось 3-5 км. Это согласуется как с теоретической оценкой, так и с данными экспериментального подбора. Количество точек ограничивалось временем, отведенным на полевые работы и транспортными возможностями.

Анализ временных вариаций микросейсм, зарегистрированных на исследуемой территории, а также при специальных наблюдениях суточного хода в т. 30, показал, что есть возможность проводить измерения не одновременно во всех точках, а проходя точки последовательно. Кроме того, было показано, что для получения наилучших результатов на данной территории измерения лучше проводить в ночные часы, т.е. с 2 до 7 часов; для того чтобы набрать «чистую» запись (без техногенных помех) необходимо проводить измерения в течение от 1 до 3 часов, длительность – в зависимости от «тишины» места регистрации.

Выводы главы 2: 1. Методика экспресс-обследования может проводиться малоканальной сейсмической станцией, обязательными элементами которой должны быть: три взаимно ортогональные сейсмометрические компоненты (вертикальная и две горизонтальные), частотный диапазон от 0,2-0,5 Гц и выше, должна быть предусмотрена возможность оперативного просмотра и возможность регистрации в поле; 2. Система наблюдений строится на последовательном прохождении территории по набору точек, расстояние между точками 3-5 км, длительность регистрации 1-3 часа.

Глава 3 посвящена методикам обработки и интерпретации микросейсм эндогенной и техногенной природы.

1. Обработка техногенной компоненты микросейсм. В литературе и в предыдущих главах показано присутствие в микросейсмах сигналов от техногенных источников. В работах (Юдахин, Капустян, 2004; Юдахин и др., 2007) детально обсуждаются такие сигналы и рассматривается возможность использования их как зондирующего сейсмического сигнала. Техногенная компонента, как правило, представлена в спектре микросейсм в виде узких пиков. Особенностью ветровых колебаний зданий является то, что собственная частота источника очень стабильна, однако этот источник связан с грунтом, и поэтому окно анализа необходимо подобрать таким образом, чтобы в разные времена года при вариациях свойств грунта «не потерять» собственную частоту колебаний техногенного источника. Кроме того, главной особенностью ветровых колебаний сооружений является переменная амплитуда сигнала, определяемая ветровыми пульсациями.

Амплитудная модуляция гармонических сейсмических сигналов, излучаемых при ветровых колебаниях сооружений, в сейсмических исследованиях может использоваться двояко. Во-первых, устанавливая контрольную точку регистрации вблизи излучателя, можно проводить свертку этого сигнала с записями в разных точках площадки, т.е. получать аналог сейсмического просвечивания с вибраторами. Во-вторых, можно пойти более простым путем – вести наблюдения одновременно (или почти одновременно) в двух точках в течение нескольких часов и затем строить распределения амплитуд сигналов. Как правило, получаются очень «добротные» нормальные распределения, что связано с фундаментальными свойствами ветровых пульсаций. По распределениям строят оценки медианного значения, которые можно использовать как характеристики амплитуд сейсмических сигналов в точках.

2. Анализ эндогенного микросейсмического излучения. Для одноточечных трехкомпонентных $i, j = X, Y, Z$ наблюдений выделение эндогенного излучения проводится на статистическом уровне с применением спектрального анализа: спектров мощности записей $S_{ii}(f)$ и функций когерентности компонент: $k_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|}{\sqrt{S_{ii}(f) \cdot S_{jj}(f)}}$, $|S_{ij}(f)|$ – взаимный осредненный спектр. Физический смысл

функции когерентности состоит в том, что это коэффициент корреляции различных частотных составляющих. В работе (Капустян и др., 2002) для случая оценки когерентности было показано, что локальные максимумы когерентности указывают на присутствие локализованных в пространстве источников, в том числе и эндогенного излучения. Показано, что функция когерентности зависит от угла подхода сигнала и его спектра в точке регистрации. Анализируя функцию когерентности при наблюдениях в одной точке нельзя разделить источники, лежащие на одном луче.

Тем не менее, при решении задачи поиска эндогенных источников сопоставление функций когерентности в соседних точках и в разных плоскостях, секущих среду (пары компонент X-Y, Z-X, Z-Y) позволяет понять, присутствуют ли точечные источники помех, каковы их частоты, а так же

попытаться определить их природу, исходя из временного хода, сравнения с данными микробарографа и записей в дневнике наблюдений. Для выявления закономерностей временного хода параметров микросейсм результаты представляются в виде диаграмм спектрально-временного (СВАН) и когерентно-временного анализа (КВАН), т.е. это расчеты соответствующих величин в скользящем по оси времени окне.

Для экспресс-обработки данных нами был опробован следующий алгоритм, на основании которого был составлен пакет обработки. При работе с цифровой станцией на базе notebook прием сигнала идет по 4 каналам в непрерывном режиме, и проводится расчет спектров и когерентности в скользящем временном окне (128, 256, 512, 1024 точек): спектрально-временной анализ (СВАН) и когерентно-временной анализ (КВАН) для разных компонент и их комбинаций. СВАН-диаграммы позволяют увидеть особенности временного хода процессов тогда, когда мощность этого процесса превосходит фон. КВАН-диаграммы хорошо работают тогда, когда интересующие сигналы по мощности меньше фона. По диаграммам выбирается «базовая сетка» – значения 3-4 частот, характерных для эндогенного излучения в точке наблюдения и для «тихих» (без сигналов) интервалов. Выбор «базовых» частот ведется интерпретатором по тому, какие из них устойчиво присутствуют на КВАН-диаграмме в виде максимумов, т.е. в среде существуют такие области, которые постоянно излучают сигнал в соответствующем частотном диапазоне. «Тихие» базовые частоты определяются для тех интервалов КВАН-диаграммы, где постоянно нет излучения. Для временных срезов КВАН-диаграмм на базовых частотах строятся распределения когерентности, которые являются графическим выражением закона Ципфа-Парето.

3. Математическое моделирование применимости когерентно-временного анализа для оценки микросейсмической активности. Цель математического моделирования – показать чувствительность распределения функции когерентности (графика Ципфа-Парето) к изменению количества событий (числа микроимпульсов), т.е. к изменению сейсмического режима обследуемого участка территории (Шахова, Антоновская, 2006). Была произведено «включение» в запись микросейсм определенного числа реальных событий (микроимпульсов). Нас интересуют события, скрытые под фоном, поэтому для амплитуд включенных событий соотношение сигнал-фон $S/N \leq 1$. Для обоих случаев построены распределения когерентности и получено изменение наклона графика (рис.2), что отражает чувствительность функции когерентности к изменению активности среды.

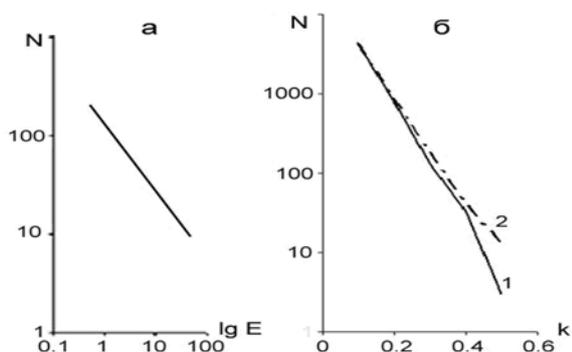


Рисунок 2 – Распределения: а – модельный график повторяемости для импульсов, добавляемых в реальную запись микросейсм, б – когерентности k по записям микросейсм: 1 – исходной, 2 – с наложением импульсов

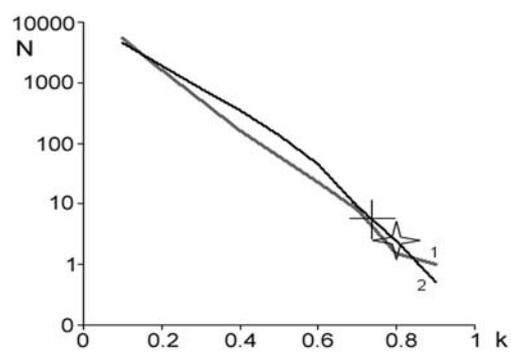


Рисунок 3 – Распределения k по результатам обработки микросейсмических записей на участке «Вуорио»: 1 – сечение вдоль разрывного нарушения, 2 – поперек разрывного нарушения, значки-результаты обработки импульсов, превышающих фон

Кроме микрособытий на записях встречаются отдельные микроимпульсы больших энергий, которые уже видны над фоном. За время наблюдений было отмечено несколько типов сигналов на фоне сейсмического шума, в том числе микроимпульсы предположительно эндогенной природы; цуги, подобные записям сейсмических событий; местные слабые события, они иллюстрируются в разделе 3.2.

На принятом нами интервале регистрации событий, превосходящих фон, недостаточно для построения статистических оценок. Тем не менее, их можно использовать для так называемой «нормировки» – связи получаемого нами распределения когерентности с привычным графиком повторяемости для более крупных событий. Для этого мы воспользовались данными полученными в экспедиции совместно ИДГ РАН, ИФЗ РАН и КарНЦ РАН на участке «Вуорио» (Карелия). Нами велась обработка сейсмометрических данных ИФЗ РАН, причем применены два способа. Во-

первых, для анализа использовалась наша методика, основанная на когерентно-временном анализе всей записи. Были построены распределения когерентности для сечений вдоль разрывного нарушения (Z–N–S) и вкрест него (Z–E–W) (рис. 3). Кривые разнятся, что означает большее количество микрособытий вкрест разлома, что хорошо согласуется с результатами по методике ИДГ РАН.

Второй тип обработки – нами на всех записях выделялись импульсы, амплитуда которых превышала фон, оценивалась энергия, выделяемая в очаге по известному соотношению (*Родионов и др., 1971*). Получено, что данные импульсы принадлежат к 1-2 энергетическому классу, среднее число событий в час равно 6. По данным ИДГ РАН среднее значение микроимпульсов примерно 2 класса равно 3 в сутки (*Кочарян, Спивак, 2001*). Все эти данные были нанесены на рис. 3, исходя из количества импульсов и признака совпадения с графиком. Обе точки хорошо легли на график, но они находятся очень близко друг к другу. Это осложняет расчет наклона графика и практически не дает возможности совместить графики повторяемости и распределения когерентности. Чтобы точки на графике были разнесены необходимо больше время наблюдений для регистрации событий большего энергетического класса или постановка методических наблюдений в известном сейсмоактивном регионе. Такие работы планируются в будущем.

Выводы главы 3:

1. В спектре микросейсм присутствуют квазигармонические техногенные сигналы, источниками которых являются, в том числе, ветровые колебания сооружений. Сейсмические сигналы представлены набором монохроматических составляющих с частотами собственных колебаний объектов и с переменной во времени амплитудой. Эти сигналы возможно выделить из фона микросейсм путем спектрального анализа с целью использования для сейсмического просвечивания среды.

2. Экспериментально установлено, что разрывные нарушения на слабоактивных платформенных территориях постоянно излучают сейсмическую энергию в виде потоков микрособытий с характерными амплитудами смещений от долей нанометров и выше и в частотном диапазоне единицы-десятки Герц. Наиболее слабые микрособытия маскируются фоном микросейсм и их присутствие может быть обнаружено путем анализа функции когерентности трехкомпонентных сейсмических записей в точке наблюдений. Предложены схемы статистического анализа микрособытий, проведено тестирование путем математического моделирования, которое показало, что в качестве параметра, характеризующего распределение по энергиям сейсмического излучения, может быть использовано распределение функции когерентности для записей попарно вертикальной и горизонтальной компонент.

3. Интерпретация микросейсм в схемах с точечной регистрацией – комплексная с выделением техногенных монохроматических сигналов и эндогенного излучения. Описан пакет программы обработки микросейсм эндогенной и техногенной природы при точечных трехкомпонентных наблюдениях, включающий расчет спектров и функций когерентности в скользящем временном окне – спектрально-временной анализ (СВАН) и когерентно-временной анализ (КВАН) для разных компонент и их комбинаций.

В главе 4 приводятся результаты выявления аномальных зон в верхах коры Архангельской области по экспресс-методике обследования территории.

Изменение напряженно-деформированного состояния среды, в том числе, параметров эндогенного сейсмического излучения при изменяющихся внешних воздействиях в естественных условиях изучить очень сложно, поэтому для доказательства чувствительности методики к геодинамическим процессам необходимо было найти натуральный объект, моделирующий процессы. Требования к натурному объекту: известное строение среды объекта, известные величина и характер внешней нагрузки, минимальный фон помех. В Архангельской обл. есть уникальное место, где техногенный шум минимален – это Соловецкие о-ва (Белое море). В низкочастотной части спектра микросейсмический фон «приподнят» за счет приливов, но для моделирования это не помеха, т.к. основные микроимпульсы имеют большую частоту и обработка ведется в высокочастотной области. Здесь были выбраны прекрасные натурные объекты для тестирования, моделирующие блоковую среду и разные типы воздействия. Первый – это морская валунная дамба XIX в., соединяющая о-ва Б. Соловецкий и Б. Муксалму через пролив. Второй объект – валунно-земляная дамба (малая дамба) на оз. Б. Красное для укрепления берега озера. Для изучения специально были подобраны два принципиально разных процесса: морская дамба постоянно

подвержена воздействию приливов, т.е. изменению уровня воды – это медленное, плавное и постоянно присутствующее воздействие; на малой дамбе нами производились удары кувалдой – аналог резких изменений в среде.

1. Морская дамба – поистине циклопическое сооружение из крупных (1 м и более) валунов, соединенных песчано-глиняным наполнением. Длина дамбы – около 1 км, высота – 6-7 м, около 2 м находится под водой. Таким образом, дамба может служить натурной моделью сильно раздробленной блоковой геологической среды. Основным воздействием на коротких временных интервалах (в несколько часов) при штиле является действие морского прилива, оценка дает изменение боковой нагрузки на дамбу в 0,1 бар. Такой пригруз по величинам близок к воздействиям, способным вызывать изменения свойств среды и влиять на течение геодинамических процессов (Капустян и др., 1998).

Сейсмометрические наблюдения велись в центральной части дамбы, сейсмометры СМ-3: вертикальный (Z) и два горизонтальных, ориентированных вкрест (X) дамбы и вдоль (Y) дамбы, частота опроса каналов позволяла вести наблюдения на частотах до 70 Гц. Регистрация – 3 часа во время максимальной фазы прилива – подъема воды и начала ее спуска, т.е. моделировалось действие знакопеременной нагрузки. Существенно, что был полный штиль. При обработке анализировалась форма записи микросейсм, спектры мощности и функции когерентности попарно для всех компонент для выявления микроимпульсов, скрытых фоном микросейсм.

На рис. 4 приведен характерный участок записи микросейсм. Видно, что сигнал на X-компоненте (вкрест дамбы) существенно отличается от такового на Y и Z, особенно по высокочастотной составляющей. Отмечено несколько микрособытий, которые хорошо выделяются на Z и Y, на X их вступления маскируются непрерывный поток импульсов.

Характерная частота для отмеченных микроимпульсов составляет примерно 40 Гц, именно эта величина (40 Гц) оценивается как собственная частота колебаний блоков с размером 1 м (Кочарян, Спивак, 2003).

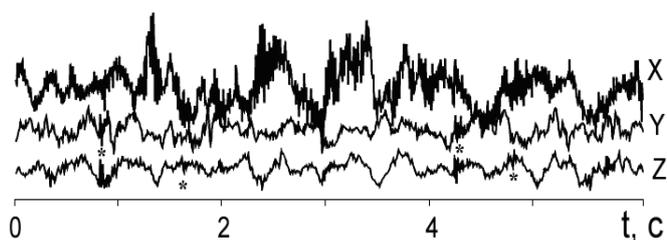


Рисунок 4 – Участок трехкомпонентной записи микросейсм на морской дамбе (звездочками отмечены микроимпульсы, видимые над фоном)

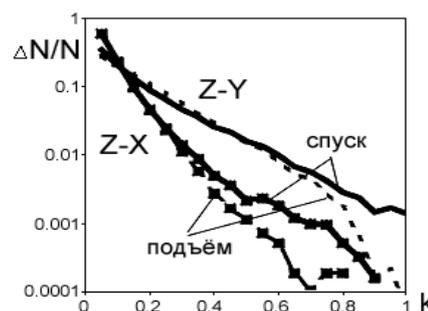


Рисунок 5 – Распределения функций когерентности для пар: Z-X (кривые отмечены значками) и Z-Y (без значков) на интервалах подъема (пунктир) и спуска воды (сплошные линии)

Для увеличения количества значений когерентности k , участвующих в распределении, мы использовали данные, полученные по набору статистически независимых сечений на высоких частотах КВАН-диаграмм, пользуясь тем, что излучение достаточно широкополосное; получен набор в $N=37000$ событий (рис. 5). Характер графиков распределений (нормированных на общее число N) близок к линейному, что позволяет говорить о наклоне кривых. Сопоставление графиков показывает, что наклон графиков отслеживает изменение уровня воды, причем вкрест дамбы – в направлении действия нагрузки – различие кривых подъем и спуска воды существенно большее, чем перпендикулярно нагрузке. Использование аппаратуры, калиброванной в абсолютных уровнях, позволило оценить величину сбрасываемых напряжений ($\Delta\sigma$) при сейсмическом излучении. В соответствии с представлениями о процессах при стесненном повороте (Кочарян, Спивак, 2003) – наиболее вероятным механизмом в данном случае: $\Delta\sigma = v_0 N G / L \pi f$, где $v_0 \approx 100$ нм/с, – максимальная амплитуда импульсов на частоте 40 Гц, $N=5$ – число фаз записи, $G=2 \times 10^{10}$ Па (гранит), $L=1$ м – характерный размер блока, $f=40$ Гц, получаем $\Delta\sigma \approx 100$ Па = 10^{-3} бар. Эта оценка хорошо согласуется с определениями сброса напряжений в ряде районов, в том числе для Ловозерского массива (Кочарян, Спивак, 2003), что также указывает на достаточно хорошее подобие исследуемой натурной модели и истинной геодинамической ситуации. Учитывая оценку величины действующей на среду нагрузки (0,1 бар) можно оценить, что в высокочастотном сейсмическом излучении сбрасывается примерно 1% от действующей нагрузки. Таким образом, используемая оценка –

распределение функций когерентности – оказалась чувствительной к слабым изменениям полей напряжений (менее 0,1 бар), действующих на блоковую структуру. Кроме того, методика чувствительна не только к величине воздействия, но и к направлению.

II. Малая озерная дамба сложена из местных крупнозернистых песков и валунов. С двух противоположных сторон дамба зажата берегами, т.е. она работает как своеобразная диафрагма. Длина дамбы – около 280 м, максимальная высота – 3 м. Сейсмометрические наблюдения были ориентированы вкрест и вдоль дамбы, длительность – 2 часа. Основным воздействием являлись удары кувалдой, одиночные и сериями, в связи с выполнением малоглубинной сейсморазведки. Анализировался временной ход мощности потока импульсов (кол-во импульсов в единицу времени), построенный путем когерентно-временного анализа для сечений вкрест и вдоль дамбы (рис. 6). Видны следующие закономерности – после окончания ударных воздействий остаточный средний фон в направлении вдоль дамбы превышает таковой в направлении вкрест дамбы, т.е. сбрасывание средой «запасенной» от ударов энергии в виде потока микроимпульсов происходит дольше. Существенно, что в поперечном направлении дамба не закреплена, в продольном – существует дополнительное поле внутренних напряжений из-за закрепления дамбы у берегов. Полученный экспериментальный результат еще раз подчеркивает роль внутренних тектонических напряжений на процесс высвобождения сейсмической энергии.

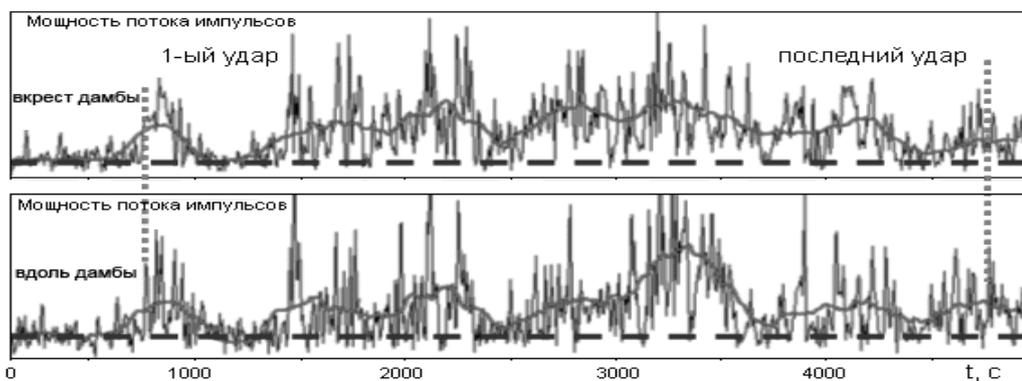
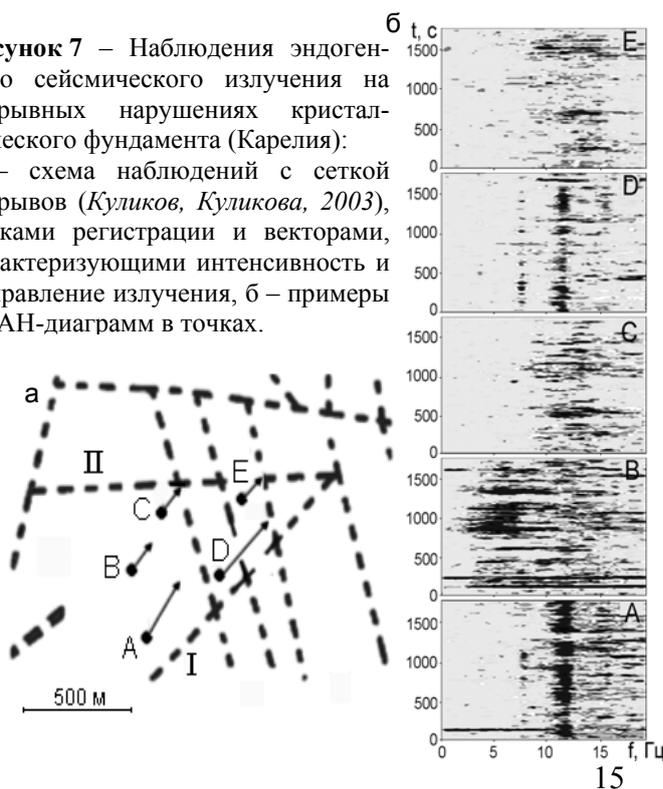


Рисунок 6 – Временной ход мощности потока импульсов при ударных воздействиях на модель блоковой среды (малая дамба), черный пунктир – уровень потока до ударов, серая кривая – средний поток импульсов (скользящее среднее)

Таким образом, на натуральных моделях, свойства которых соответствуют природной блоковой среде, показано, что точечные малоканальные сейсмометрические наблюдения с использованием анализа эндогенного излучения позволяют выявить геодинамические процессы, вызванные слабыми изменениями полей напряжений двух видов – плавных и ударных. Данные эксперименты можно рассматривать как своеобразную калибровку методики оценки состояния и свойств блоковой среды, пригодной для поиска разрывных нарушений и мониторинга их активности.

Следующий шаг тестирования – наблюдения процессов на реальном разрывном нарушении, но

Рисунок 7 – Наблюдения эндогенного сейсмического излучения на разрывных нарушениях кристаллического фундамента (Карелия): а – схема наблюдений с сеткой разрывов (Куликов, Куликова, 2003), точками регистрации и векторами, характеризующими интенсивность и направление излучения, б – примеры КВАН-диаграмм в точках.



не скрытом осадочным чехлом, а выходящим на дневную поверхность. Нами обрабатывались наблюдения микросейсм вдоль сухого русла р. Суны, п. Гирвас в Карелии на детально исследованных выходах на поверхность коренных пород фундамента. Территория разбита на небольшие блоки. Разломы имеют сбросо-сдвиговый характер с небольшой (до первых метров) амплитудой перемещения. На плоскостях иногда сохраняются зеркала скольжения и тектоническая глинка трения. Анализировались поля микросейсм по трем компонентам Z, N-S, E-W в точках А, В, С, D и E, точки выбраны так, чтобы контролировать сетку разрывных нарушений (рис. 7). КВАН-диаграммы функции когерентности демонстрирует существенное различие микросейсмических ситуаций в точках наблюдения,

выражающееся в особенностях как частотного состава эндогенного сейсмического излучения, так и разнице в уровнях. По КВАН-диаграммам видно, что они подобны для пар точек А - D и С - Е, но сами пары существенно различаются между собой. Ситуация в точке В не похожа ни на одну из таковых для пар. Действительно, в т. А и D КВАН-диаграмма представлена в виде поля с явным постоянным излучением на преимущественной частоте примерно 12 Гц. В т. С и Е излучение более широкополосное и высокочастотное, причем существенно, что эндогенное сейсмическое излучение происходит не постоянно, а порциями с некоторыми паузами. В т. В излучение широкополосное, низкочастотное и достаточно постоянное. Кроме того, по соотношениям когерентности в широтном и меридиональном сечениях в точках были построены оценки направленности эндогенного излучения, которые оказались близи к азимуту разлома *I*. Все эти особенности позволяют заключить, что в сетке разрывных нарушений наиболее активным является разлом *I*, нарушение *II* играет подчиненную роль, а т. В лежит в «целиковом» блоке вдали от разлома. На данном примере иллюстрируется чувствительность методики к различиям в геодинамической картине процессов на разрывных нарушениях.

Экспресс-обследования территории Архангельской промышленной агломерации для выявления разрывного нарушения. Сейсмологические данные в районе пока недостаточны для того, чтобы судить о активности различных частей территории. По существу, в настоящее время схемы наблюдений на платформах только формируются, поэтому для рекогносцировки будущих детальных исследований использовалась разрабатываемая нами экспресс-методика. В асейсмичных платформенных районах исходными данными для определения активности может служить эндогенное сейсмическое излучение, представленное микросейсмями и слабыми событиями – микроземлетрясениями, микроимпульсами и пр. Частотный состав колебаний – 1-20 Гц (до 40 Гц для слабых импульсов). В этой полосе абсолютный уровень регистрируемых сигналов характеризуется значениями от 0,2 до 500 мкм/с для «шумовой дрожки» (стандартного отклонения) микросейсм (разброс зависит от точки и времени суток), импульсные события примерно на два порядка превосходят фон. Динамический диапазон меньше, чем в сейсмоактивных районах, т.е. чувствительность каналов к регистрации слабых сигналов должны быть больше. На примере полевых наблюдений, нацеленных на выявление разрывного нарушения в Приморском районе Архангельской области, представлены два независимых метода анализа, основанных на двух составляющих микросейсм – техногенной и эндогенной.

Территория Беломорско-Двинского района по имеющимся геолого-геофизическим данным может рассматриваться структура с возможной сейсмической активностью (см. гл. 1). После изучения карт разрывной тектоники, составленных многочисленными авторами и по большей части существенно различающихся между собой, нами была выбрана карта активных разломов по геологическим и геофизическим данным, составленная в 1996 г. под редакцией В.Г. Трифонова. Основным разлом на этой карте представлен линейной структурой соединяющей точки с координатами 64,7° с.ш. 39,7° в.д. и 64,3° с.ш. 40,8° в.д., возможно его продолжение от Архангельска на Новодвинск-Холмогоры. Линия, отражающая разлом, ложится на левый берег р. Северной Двины и левый берег Двинской губы (рис. 1).

Рекогносцировочные полевые наблюдения с целью уточнения местоположения и определения активности разлома недалеко от г. Архангельска в Приморском районе проводились в два полевых сезона 2003 и 2004 гг. с помощью двух одновременно работающих цифровых станций КБС-2, перемещавшихся по территории (более 50 точек). Регистрация микросейсм велась в полосе 0,5-20 Гц с трехкомпонентной расстановкой (Z, N-S, E-W) длительность записи составляла 3 часа. На участке Северодвинск-Архангельск линия разлома проходит по заболоченной местности, протокам и островкам дельты реки Северной Двины. Доступными для наблюдений являются участки с более плотными грунтами, т.е. вдоль дорог и вблизи освоенных территорий (населенные пункты, пастбища, заброшенные промзоны). Исходя из этого, строилась система наблюдений, см. гл. 3. Координаты точек определялись по GPS.

Анализ эндогенного излучения. В качестве параметра, характеризующего распределения по энергиям сейсмического излучения, использовалась оценка функции когерентности $k(f)$ записей вертикальной Z и горизонтальных (N-S, E-W) компонент. Расчет когерентности в скользящем временном окне $k(f, t)$ (КВАН) и анализ получаемых полей позволяет выделить частоты, на которых излучается сейсмический сигнал из локальной области в среде. Сечение КВАН-диаграммы на этих частот, по существу, является локальным «каталогом» для очень слабых событий, где «отмечены»

моменты появления импульсов и оценена энергия в сравнении с уровнем фона. Местоположение излучающей области – окрестность точки наблюдения – по нашим оценкам не более 3-5 км. Получение «каталога» позволяет построить по нему распределение, соответствующее закону Ципфа-Парето, в логарифмическом масштабе – прямая линия, по наклону которой b можно судить о соотношении числа событий разной интенсивности. Схема обработки, основанная на анализе КВАН-диаграмм, является другой возможностью реализации идеи сейсмологии микромасштаба (Рыкунов, Смирнов, 1996). Преимущество нашей методики по сравнению с анализом временных последовательностей всплесков мощности микросейсм (Рыкунов, Смирнов, 1996) состоит в том, что удается отсеять часть помех, связанных с движущимися источниками сигналов. Это удается сделать благодаря свойствам функции когерентности, которая исключает протяженные источники, и сравнивая КВАН-диаграммы для горизонтального X-Y и вертикальных сечений среды X-Z, Y-Z.

Для точек наблюдений 2003 г. по широтному и меридиональному сечениям среды построены распределения когерентности для эндогенного микросейсмического излучения на высоких (17,4 Гц) и низких (2,2 Гц) частотах (рис. 8). Видно, что для высокочастотного среза наибольший разброс кривых и наименьший наклон графиков b характерен для широтного направления, это соответствует большому количеству более интенсивных микрособытий, т.е. по существу, отражает уровень геодинамической активности. В меридиональном – ситуация более «спокойная» и близкая к таковой для частоты 2,2 Гц, т.е. для более крупных (на порядок) блоков среды.

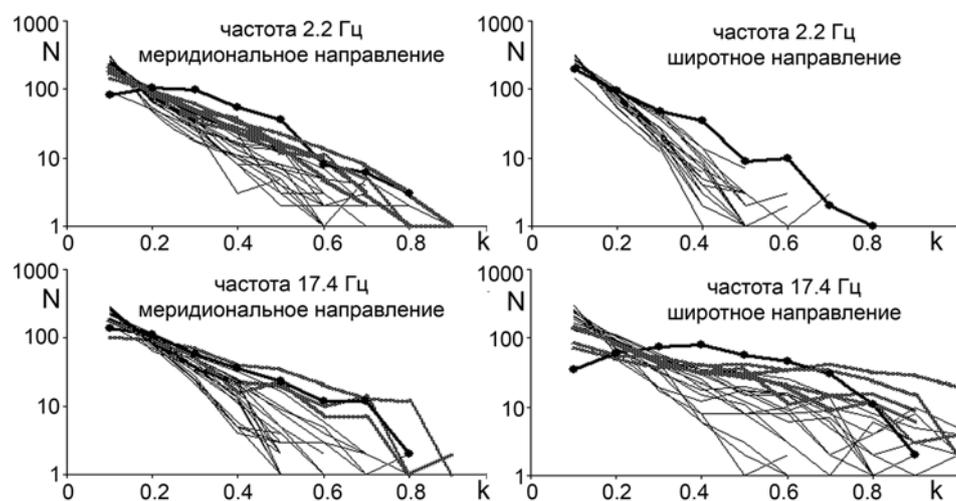


Рисунок 8 – Подборки для разных частот и направлений кривых – результатов оценки распределений функции когерентности микросейсм, зарегистрированных в Приморском р-не Архангельской обл.: тонкие линии – для пунктов с малым вкладом техногенной компоненты, толстые – с активным техногенным воздействием, кружками отмечена кривая для п.Рикасикха

По результатам анализа микросейсмического поля была построена серия карт для глубинного эндогенного сейсмического излучения (рис. 9, 10): интенсивности, характеризуемой количеством микроимпульсов за 1 час; анизотропии – отношения количества в меридиональном и широтном направлениях. Обрез карт соответствует разрешающей способности системы наблюдений, включающей точки регистрации в 2003 и 2004 гг. Сравнение этих карт показывает следующее:

- наиболее активным в области A является зона, отмеченная стрелкой; совпадение местоположения зон для частот 17,4 и 2,2 Гц говорит о наличии общего механизма, управляющего здесь геодинамикой для более крупных и мелких отдельных (блоков среды),
- для сегмента B предполагаемого разлома сдвиг высокочастотного излучения на юг по сравнению с таковым для 2,2 Гц указывает на возможность рассогласования геодинамических процессов для блоков разного размера (на разных иерархических уровнях), что говорит о сложном характере деформирования, свойственному тектоническому узлу. Это же подтверждается несогласием линий смены направлений излучения на двух картах в этой области (рис. 9б, 10б).

Отмеченные закономерности подтверждают также карты параметров b (наклона графика распределения когерентности) для эндогенного микросейсмического излучения (рис. 11а), они показывают значительную неоднородность пространственного распределения b . Точки с наибольшей активностью излучения ложатся в пределах субширотной линейной зоны. На карте преобладающей частоты (рис. 11б) видно, что этой же зоне соответствует наиболее высокочастотное эндогенное излучение с максимумом в области A .

Сопоставление карт параметров эндогенного микросейсмического излучения показывает, что принятая методика интерпретации записей микросейсм позволила разделить участки территории по геодинамической активности и указать наиболее активные.

Сейсмическое просвечивание с использованием техногенных ветровых колебаний сооружений. Активные эксперименты – просвечивания среды района – выполняются с использованием техногенных сейсмических сигналов. Одним из объектов, способных генерировать сейсмические колебания при воздействии пульсаций атмосферного давления (при порывах ветра), являются высокие инженерные сооружения: здания, трубы и башни, мосты, мощные краны и пр. Эти колебания «входят» в геологическую среду и распространяются на значительные расстояния, где они «узнаваемы» по значению резонансной (собственной) частоты. Детальные натурные наблюдения, в том числе и с нашим участием, выявили, что ветровые колебания сооружений передаются через основания и фундаменты в верхи земной коры (Капустян, Юдахин, 2003; Юдахин и др., 2004; Острецов и др., 2004). Учитывая, что в атмосфере постоянно присутствуют флуктуации давления, инженерные объекты становятся своеобразными вибраторами, излучающими монохроматические сейсмические сигналы. Эти колебания имеют малую амплитуду, тем не менее, опыт работ по просвечиванию Земли с геофизическими вибраторами показывает возможность распространения слабых сигналов на значительные расстояния – в сотни километров (Николаев, 1977; Мак Эвили, 1997; Алешин и др., 1987 и пр.). По существу, ветровые колебания сооружения являются своеобразным источником, освещающим земную кору, причем источник излучает всегда и бесплатно, что важно для производства работ.

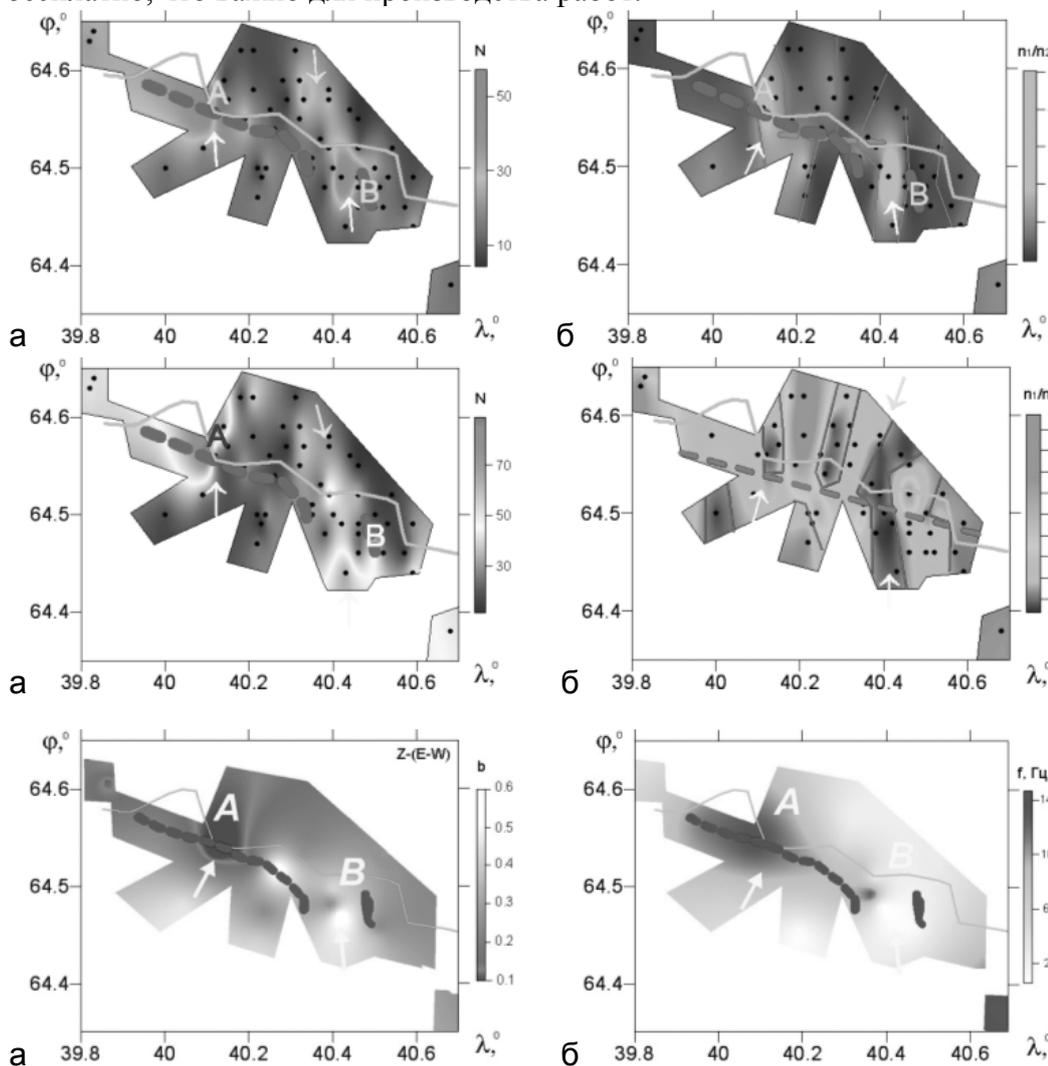


Рисунок 9 – Карты параметров эндогенного микросейсмического излучения, частота 2,2 Гц: а – интенсивности, б – анизотропии (линия – левый берег р. С. Двина)

Рисунок 10 – Карты параметров эндогенного микросейсмического излучения, частота 17,4 Гц: а – интенсивности, б – анизотропии (линия – левый берег р. С. Двина)

Рисунок 11 – Карты: а – параметра b эндогенного микросейсмического излучения для широтного сечения, б – преобладающей частоты (тонкая линия – берег р. С. Двина, толстая – зона предполагаемой раздробленности)

При микросейсмическом обследовании Беломорско-Двинского р-на Архангельской обл. было отмечено, что в одной из точек на записи доминируют колебания, возбуждаемые при ветровых воздействиях на систему порталных кранов на берегу р. С. Двина. Эти колебания мы использовали для построения системы наблюдения с активными просвечиваниями среды. Для собственных ветровых колебаний сооружений характерно следующее. Как правило, доминируют колебания первой формы (основная частота), хотя могут быть интенсивны и обертоны; значение частот определяется конструкцией сооружения. Амплитуды колебаний изменяются во времени, что связано, в основном, с воздействием порывов ветра. Яркий пример – колебания системы

портальных кранов (рис. 12), представленные в спектре мощности микросейсм в виде первой и второй гармоник – 5,2 и 10,4 Гц, вариации амплитуд записи отражают затухающие колебания добротной системы при порывах ветра.

Сейсмические сигналы от собственных колебаний сооружений являются одной из компонент микросейсмического фона, которая отделялась от эндогенного излучения в процессе обработки. По существу, задача сводилась к выделению гармонических колебаний известной частоты, что достаточно просто решается с помощью аппарата спектрального анализа. В каждой точке наблюдений оценки амплитуд ветровых колебаний, просвечивающих среду, можно получить следующим образом. Проводят определения значений амплитуд соответствующего спектрального пика на длительном участке записи (например, по временному срезу СВАН-диаграммы на нужной частоте). Затем в полученном временном ряду строят распределения значений амплитуд, в качестве величины амплитуды, характеризующей точку, можно принять медианное значение.

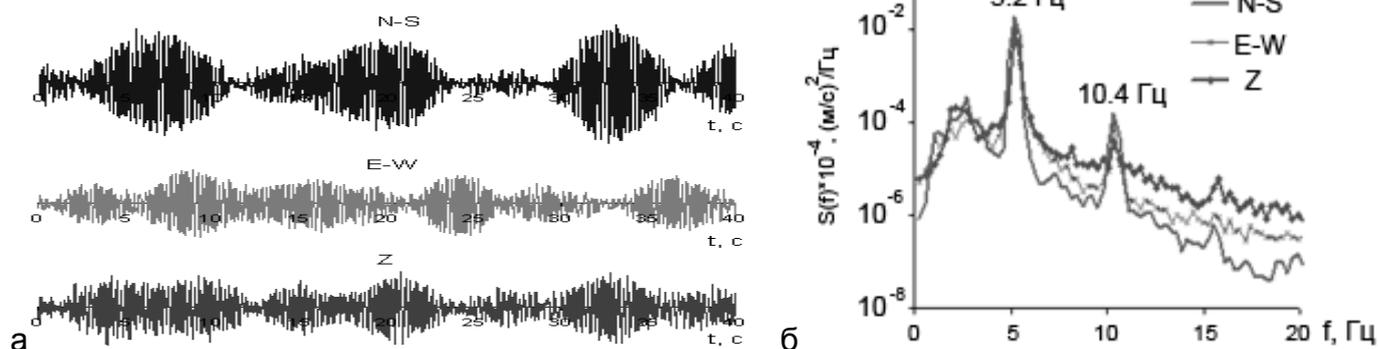


Рисунок 12 – Результаты натуральных наблюдений сейсмических сигналов, излучаемых в среду системой портальных кранов: а – сейсмограммы трехкомпонентной записи, б – спектры мощности

Анализ трехкомпонентных записей для портального крана показал, что данный сейсмический источник возбуждает колебания с круговой поляризацией в вертикальной плоскости, ориентированной вкrest луча и линейной в плоскости луча. Совместно с характером ослабления амплитудных кривых с расстоянием (рис. 13) этот факт свидетельствует об излучении конструкцией преимущественно не поверхностных, а объемных поперечных сейсмических волн, распространяющихся в среде. Это обусловлено характерной для Архангельской обл. свайной конструкцией фундамента.

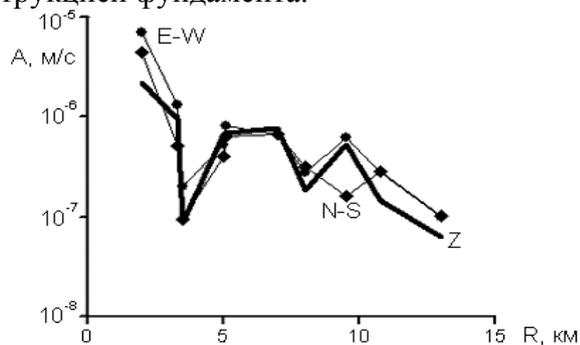


Рисунок 13 – Амплитудные кривые сейсмического сигнала для частоты 5,2 Гц

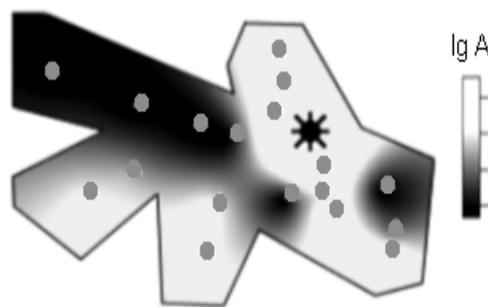


Рисунок 14 – Карта-схема медианных значений амплитуд сейсмических сигналов для частоты 5,2 Гц: звезда – местоположение системы портальных кранов

Результаты анализа записей микросейсм, полученных в точках, находящихся на разных расстояниях от источника, показывают, что в одних точках частота 5,2 Гц прослеживается явно, а в других, хотя и находящиеся на довольно близком расстоянии, сигнал на частоте 5,2 Гц не выделяется. Была проведена оценка медианных значений для распределения совокупности величин амплитуд за 3 часа на частоте 5,2 Гц. Для разных точек наблюдений это позволило составить пространственную картину распространения сигнала – карты-схемы пространственного распределения амплитуд для Z, N-S, E-W компонент. Учет амплитудной кривой позволил произвести вычитание из экспериментальных карт-схем тренда, определяемого законом ослабления амплитуды с расстоянием. Учет тренда дает более равномерную картину пространственного распределения амплитуд, на которой более отчетливо выделяется темная полоса, соответствующая повышенному поглощению просвечивающих среду колебаний (рис. 14).

Полученные карты-схемы выявляют зоны повышенного поглощения сигнала, которые хорошо согласуются с зонами повышенного эндогенного микросейсмического излучения, что также указывает на присутствие разрывного нарушения. Таким образом, по результатам натурных наблюдений показана возможность и техника проведения инженерно-сейсмометрических обследований территорий с использованием собственных частот колебаний инженерных сооружений.

Применение методики низкочастотного микросейсмического зондирования. Экспресс-методика определения сейсмической активности платформенных территорий, описанная выше, является новаторской и оригинальной. Для комплексирования карт мы применили также методику низкочастотного микросейсмического зондирования для выявления неоднородностей в верхней части разреза (разработанную А.В. Горбатиковым и др.). Методика базируется на анализе пространственного распределения амплитуд вертикальной составляющей микросейсмического поля для всех частот спектра в допущении, что вертикальная компонента поля для частот 0,02-1,0 Гц в основном определяется вкладом фундаментальной моды поверхностных волн Рэлеевского типа. Допущение относительно преобладания в вертикальной компоненте микросейсмического поля волн Рэлеевского типа основывается на большом количестве экспериментальных исследований, выполняемых в мире, и в настоящее время может считаться обоснованным и хорошо известным (Горбатиков и др., 2007; Zaslavsky, Shapira, 2000).

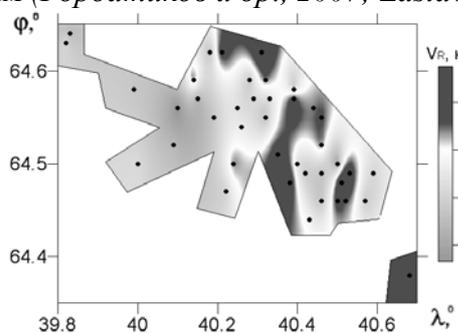


Рисунок 15 – Карта скорости V_R поверхностной волны Рэля, построенная по методике низкочастотного микросейсмического зондирования

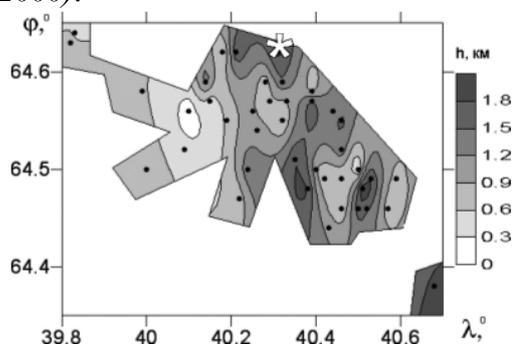


Рисунок 16 – Карта глубины h залегания неоднородности, построенная по методике низкочастотного микросейсмического зондирования

В районе нашего исследования многие пункты наблюдений находятся в местах относительной близости от береговой линии, т.е. подвержены морскому приливу. Это обуславливает для микросейсм сравнительно низких частот $f < 0,2-0,3$ Гц следующие механизмы генерации – воздействие прибоя, а также передача вариаций давления через водную толщу на дно с последующим распространением на сушу. Кроме того, существенным является передача вариаций атмосферного давления непосредственно в земную кору. Такие микросейсм могут распространяться от источников в виде поверхностных волн на расстоянии в сотни и тысячи километров. Существенно, что нами измерения проводились примерно при одинаковых метеоусловиях. Для исследуемой нами территории по методике А.В. Горбатикова была выбрана полоса частот от 0,175 до 0,225 Гц. Эти частоты находятся на склоне амплитудно-частотной характеристики сейсмометра СМ-3, но для качественной оценки это допустимо. Рассчитывалась скорость поверхностных волн Рэлеевского типа: $V_R = V_0(1 - \xi)$, где $\xi = \sqrt{(A_{\max} - (A_1 + A_2)/2)/(A_1 + A_2)/2}$, A_{\max} – значение скорости смещения на спектральной частоте 0,2 Гц, A_1 и A_2 – значения скорости смещения в крайних точках выбранного частотного диапазона. Среднее значение скорости Рэлеевской волны V_0 была выбрана 0,5 км/с с учетом того, что для данного региона характерны водонасыщенные грунты, для которых скорость поперечных волн понижена, т.е. будет также понижена скорость Рэлеевских волн учитывая соотношение $V_R = 0,9V_s$. Как было показано А.В. Горбатиковым, глубину расположения неоднородности h можно оценить соотношением: $h = \lambda/2$, где $\lambda = V_R/f$, f – частота, для которой определяется значение A_{\max} . Были построены карты скорости V_R (рис. 15) и глубины h (рис. 16).

Видно, что для областей с наиболее интенсивным эндогенным излучением (карты интенсивности для частот 2,2 и 17,4 Гц, рис. 9а, 10а) характерны скорости близкие или меньшие, чем V_0 (светло-серые участки на рис. 15). На данных участках неоднородность практически выходит на поверхность ($h \sim 100-300$ м) (рис. 16). Сильное превышение скорости V_R над V_0 (темно-серые участки на рис. 15) характерно для участков с глубоким залеганием неоднородности

($h \sim 2$ км). Также четко видно направление северо-западного простирания, для которого характерно пониженное значение скорости V_R . Кроме того, получаем, что в области эпицентра землетрясения произошедшего 22 октября 2005 г. (на рис. 16 обозначен белой звездой), значение глубины залегания неоднородности $\sim 1,5-2$ км, гипоцентр этого землетрясения согласно (*Землетрясения России в 2005 г., 2007*) располагается на глубине 2 км. Сопоставление с данными имеющихся скважин (*Станковский, 1986*) показывает, что это – глубины фундамента. Характерно, что на рис. 16 также четко прорисовываются поперечные структуры фундамента, в частности, наличие резкой ступени со смещением блоков фундамента с амплитудой примерно 900 м. Подобное смещение могло произойти в результате подвижки по разлому поперечного направления. По-видимому, именно к этому разлому и приурочен очаг землетрясения 22 октября 2005 г.

Комплексное рассмотрение результатов работ по выявлению разлома и оценке его микросейсмической активности. По результатам проведенных экспериментальных исследований на территории Приморского р-на Архангельской обл. на площади размером 50×20 км можно сделать следующие выводы о микросейсмической активности данного участка.

1). Сопоставление карт анизотропии эндогенного излучения для низких и высоких говорит о частичном несовпадении зон преобладающего направления излучения, что отражено в несогласии местоположения границ этих зон, т.е. границ маркирующих смену направления излучения. Особенно ярко это выражено в области сегмента *B*. Помимо этого здесь также наблюдается сдвиг высокочастотного излучения на юг. Все это может указывать на сложный характер деформирования, свойственный тектоническому узлу.

2). Карта по результатам просвечивания среды с помощью ветровых колебаний техногенного источника в совокупности с картами для эндогенного излучения параметра b (наклона распределения, характеризующего микросейсмический режим территории) говорит о том, что раздробленная зона имеет северо-западное простирание. Сопоставление с картами интенсивности эндогенного излучения показывает, что на всей своей протяженности зона проявляет разную активность.

3). Район п. Рикасиха в зоне *A* – место предполагаемого размещения АЭС, рассматривался особенно тщательно. Анализ параметров эндогенного излучения указывает на то, что здесь повышена его интенсивность, характерный для активной зоны наклон b и наиболее высокая преобладающая частота. Также отмечена наибольшая анизотропия высокочастотного излучения, что, в соответствии с моделью деформирования блоковой среды, указывает на размеры активных блоков в сотни метров, т.е. это говорит о значительной раздробленности данного участка территории. На участках *A* и *B* неоднородность залегает близко к поверхности (рис. 16). Таким образом, район п. Рикасиха является наиболее активным и наиболее раздробленным участком.

4). Вывод об активности разлома, выявленного по микросейсмическим данным, в последствии подтвердился землетрясением, произошедшим вблизи него 22 октября 2005 г. с магнитудой 2,8 с эпицентром, приуроченным к поперечному тектоническому нарушению, которое отчетливо прослеживается на картах 9а, 10а.

5). При продолжении исследований представляется необходимым уделить особое внимание областям, отмеченными на картах стрелками на сегментах *A* и *B*.

Проведенные экспресс-обследования сейсмической активности разрывных нарушений Приморского района Архангельской области позволили выявить участок, не пригодный для размещения АЭС. Полученные данные являются рекогносцировочными, но они позволили оконтурить область для проведения детальных сейсморазведочных работ.

Основные элементы экспресс-методики обследования территории. В главах 1-4 рассмотрены все основные элементы экспресс-методики обследования территорий для определения их микросейсмической активности. Методика связана, главным образом, с поиском ослабленных зон и тектонических нарушений. Опробование экспресс-методики на различных объектах – натуральных моделях сложнопостроенной среды (морская и озерная дамба), на разрывных нарушениях в Карелии и при наблюдениях двух полевых сезонов 2003-2004 гг. в Приморском р-не Архангельской обл., позволяет говорить о том, что методика находится в стадии действующего варианта, который может быть успешно применен на других объектах. При выборе аппаратуры важно, что обследование территорий может проводиться малоканальной сейсмической станцией с обязательной трехкомпонентной регистрацией в точке. Частотный диапазон от 0,2-0,5 Гц и выше. Канал должен обеспечивать регистрацию скоростей смещения от сотых долей мкм/с и выше.

Для практического использования методики удобно сформулировать отдельные ее элементы в виде инструкции к применению. Задача поиска разрывного нарушения основывается на наблюдении волновых полей от двух принципиально разных типов источников – эндогенного и техногенного.

I. Эндогенные источники микросейсм – пассивный тип наблюдений.

Схема наблюдений. Осуществляется последовательное прохождение территории по набору заранее выбранных профилей с набором точек, так чтобы пункты наблюдений заведомо попали в предполагаемую зону раздробленности и вне ее. Расстояние между точками на профилях не должно превышать 0,1 от максимального размера обследуемого участка. Длительность регистрации микросейсм 1-3 часа. При необходимости (например, в шумных местах) возможна замена непрерывной регистрации на кусочно-непрерывную. Если поле микросейсм в районе наблюдений в измеряемом диапазоне частот содержит как природную компоненту, так и техногенную помеху, то для уменьшения влияния техногенной компоненты лучше вести регистрацию в ночные часы, как наиболее спокойные.

Обработка основана на расчетах спектров и функции когерентности, в том числе в скользящем временном окне – на спектрально-временном анализе (СВАН) и когерентно-временном анализе (КВАН) для разных компонент и их комбинаций. Обработка включает:

- просмотр записей, выделение видимых событий,
- для микросейсмического фона – подбор длины окна спектрального анализа, проведение тотальной обработки,
- выбор всех частот, на которых проявляется эндогенное излучение. Для дальнейшего анализа – подбор двух или нескольких частот f_i . Нам априори интересуют частоты в низко- и высокочастотной области, т.к. они характеризуют излучение блоков коры разного ранга. Выбор по КВАН-диаграммам для всех точек наблюдения частоту f_{max} , на которой эндогенное излучение проявляется наиболее ярко.
- проведение частотного среза КВАН-диаграмм на выбранных частотах f_i и статистической обработки – определения количества микроимпульсов, скрытых под фоном, построение распределения когерентности, определение значения k , до которого график повторяемости прямолинеен. Для этого значения проводят подсчет количества микроимпульсов I и анизотропии A . Определяют наклон графика распределения b . Все оценки производят для всех точках наблюдения
- построение карт интенсивности I и анизотропии A эндогенного микросейсмического излучения, наклона b графика распределения в меридиональном и широтном направлениях, преобладающей частоты f_{max} излучения.

Интерпретация включает: сопоставление данных по разным точкам, увязка карт с привлечением представлений об излучении разрывов и поглощающих свойствах геологической среды, на основании чего производится выявление особых зон.

II. Техногенный источник – активный тип наблюдений. При возможности существенно систему пассивных наблюдений эндогенного излучения дополнить сейсмическим просвечиванием с использованием ветровых колебаний, методика включает следующие дополнительные элементы.

Подбор техногенного источника. Такой источник, как правило, присутствует в микросейсмическом поле в виде тонких линий спектра, которые выделяются при настройке методики. Можно заранее наметить возможный источник сигналов на площади (ретрансляторы, мачты, трубы, колокольни и пр.) и провести около них измерения для выяснения частоты сейсмического сигнала. После подбора просвечивающего среду сигнала, наблюдения проводят по следующей схеме.

Схема наблюдений. Схема регистрации микросейсм строится таким образом, чтобы было реализовано удаление от данного источника на разных направлениях и азимутах. Возможно одновременно использовать несколько источников. Для регистрации желательно две сейсмические станции – одна вблизи источника (для контроля), другая перемещаемая по площади.

Обработка. Записи просматривают, отбраковывают сильно зашумленные участки. Затем анализируется сигнал в источнике – спектр мощности и тип сигнала по поляризационным характеристикам. Для всех точек наблюдения подбирается окно анализа для выявления пика в спектре. Для каждой точки наблюдения путем расчетов спектров в скользящем временном окне, получают набор значений амплитуд (временной ход) на частоте собственных колебаний сооружения, по временному ходу строят распределение и определяют амплитуду как медианное

значение. Затем анализируются амплитудные кривые сейсмических сигналов и строят карты пространственного распределения амплитуд для Z, N-S, E-W компонент.

Интерпретация выявляет неоднородные участки на картах, т.е. зоны наибольшего поглощения сейсмических колебаний от техногенного источника.

III. Комплексирование полученных карт. Сопоставляют карты, полученные в результате обработки эндогенной и техногенной компонент микросейсм в пп. I и II. В дополнение возможно построить карты V_R и h путем интерпретации вертикальной компоненты поверхностной волны Рэлея. Производится сравнительный анализ всех карт с выявлением зон наибольшей раздробленности и оценивают их микросейсмическую активность.

Выводы главы 4.

1. Тестирование методики на натуральных моделях (морской и озерной дамбах), свойства которых соответствуют природной блоковой среде, доказало, что точечные малоканальные сейсмометрические наблюдения с использованием анализа эндогенного излучения позволяют выявить геодинамические процессы, вызванные слабыми изменениями полей напряжений разного вида – как плавно изменяющихся, так и ударных.

2. Полномасштабно методика была применена на участке территории в Приморском р-не Архангельской обл. Проведение полевых наблюдений, обработка и интерпретация материалов с построением карт: интенсивности и анизотропии эндогенного микросейсмического излучения, пространственной вариации наклона графика распределения когерентности, преобладающей частоты излучения – позволили выявить зону наибольшей сейсмической активности.

3. Просвечивание обследуемой территории с использованием сейсмических колебаний от техногенного источника позволило построить карту амплитуд, на которой отчетливо прослеживается зона повышенного поглощения сейсмического сигнала.

4. Применение методики низкочастотного микросейсмического зондирования для выявления неоднородностей в верхней части разреза для исследуемой области показало хорошее совпадение с результатами структурных построений при просвечивании техногенным источником и выявления зон повышенного эндогенного излучения.

5. Комплексирование результатов и оценка сейсмической активности разлома в Приморском районе Архангельской области позволило получить представление о строении и микросейсмической активности верхней части земной коры Приморского р-на Архангельской обл., причем с выявлением особенностей, существенных для проблем размещения АЭС в данном районе.

6. Предложена блок-схема экспресс-методики определения сейсмической активности платформенных районов.

Заключение. Представленная диссертационная работа по изучению сейсмической активности платформенных территорий на примере Архангельской области, включающая в себя обзор литературы, математическое и натурное моделирование, проведение полевых наблюдений, обработку и интерпретацию материалов, позволяет сделать ряд существенных выводов касающихся геодинамики района, отраженных в защищаемых положениях. Эти защищаемые положения основываются на следующих результатах, полученных в работе.

1. Проведено обобщение современных представлений о сейсмических проявлениях и моделях механизмов эндогенного излучения активных разломов на платформенных территориях.

2. На основании обобщения данных об уровнях микросейсмического фона и амплитудах эндогенного излучения разломов разработано техническое задание для аппаратуры регистрации микросейсмического поля в диапазоне частот от 0,2-0,5 Гц и выше.

3. Выполнена теоретическая оценка и натурные эксперименты для разработки системы наблюдения микросейсмического поля для цели обследования территорий. Предложена пространственно-временная схема сейсмических наблюдений, позволяющая провести экспресс-обследование для целей определения геодинамической активности районов.

4. Впервые собраны и систематизированы записи микрособытий на территории Архангельской области и проведена их классификация. Показано присутствие в эндогенном излучении потоков микроимпульсов с амплитудами смещений от долей нанометров и выше или магнитудами $M > -4 \div -3$.

5. Проведено математическое моделирование, которое обосновывает возможность использования статистических оценок потоков микрособытий – распределений функций когерентности для анализа геодинамической активности территории. Показано, что

незначительные изменения количества эндогенных событий приводят к изменению наклона графика, что свидетельствует об изменении сейсмического режима.

6. Исследованы натурные модели, свойства которых соответствуют природной блоковой среде. Показано, что точечные малоканалные наблюдения микросейсм с анализом эндогенного излучения позволяют выявить геодинамические процессы, вызванные слабыми изменениями полей напряжений.

7. Разработан комплекс алгоритмов и программ обработки экспериментальных записей микросейсм на основе оценки параметров эндогенного сейсмического излучения и просвечивания среды техногенными сейсмическими сигналами.

8. Показана возможность просвечивания осадочного чехла и верхов фундамента с использованием сейсмических колебаний техногенного происхождения; для обследуемой территории приморского района Архангельской обл. выявлена линейная зона повышенного поглощения сигналов, совпадающая с разрывным нарушением по геолого-геофизическим данным.

9. Для эндогенного микросейсмического излучения на территории Приморского р-на Архангельской обл. построена серия карт параметров, по которым выявлена зона наибольшей микросейсмической активности.

10. Предложена эффективная экспресс-методика определения сейсмической активности платформенных районов, включающая комплекс исследований с сейсмическим просвечиванием среды сигналами техногенных источников колебаний и выявлением в тех же точках наблюдений эндогенного микросейсмического излучения.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Основные требования к современной методике для исследования строения геологической среды и конструктивной целостности сооружений // Экология-2007. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2007. С. 7-8.
2. Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н., Шахова Е.В., Антоновская Г.Н. Выявление разрывных нарушений путем анализа эндогенного сейсмического излучения // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов. Т. 1. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. С. 369-372.
3. Шахова Е.В. Дамбы Соловков как натурные модели поведения блоковой среды под нагрузкой / Северные территории России: проблемы и перспективы развития. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2008, CD.
4. Шахова Е.В. Основные элементы экспресс-методики по определению сейсмической активности платформенных территорий // Экологические проблемы Севера: Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2008. С. 97-100.
5. Шахова Е.В., Антоновская Г.Н. Математическое и натурное моделирование для возможности оценки состояния и свойств блоковой среды // Современные проблемы геофизики. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С. 172-175.
6. Шахова Е.В., Антоновская Г.Н. Экспериментальные микросейсмические исследования на территории Архангельской области // Геология и геоэкология европейской России и сопредельных территорий. СПб: ИГГД РАН, 2004. С. 184-186.
7. Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Капустян Н.К. Экспериментальные микросейсмические исследования на территории Беломорско-Двинского сейсмоактивного района // Строение, живая тектоника и дислокации платформ и их горно-складчатых обрамлений. М., 2003. С. 288-290.
8. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Шахова Е.В., Антоновская Г.Н. К вопросу использования графика повторяемости в исследованиях геодинамических процессов // Сергеевские чтения. Выпуск 8. М.: ГЕОС, 2006. С. 370-374.
9. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Исследование геодинамических процессов на натурной модели блоковой среды // Восемь геофизических чтений им. В.В. Федынского, Тезисы. М.: МПР, 2006. С. 63.
10. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Применение сейсмических нанотехнологий при изучении активных разломов на платформенных областях / Строение, геодинамика и минерогенетические процессы в литосфере. Сыктывкар: Коми НИЦ УрО РАН, 2005. С. 412-414.
11. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием наносейсмической технологии // ДАН, Т. 405. № 4. 2005. С. 533-538.
12. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания // ДАН. Т. 402. № 2. 2005. С. 255-259.
13. 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. Вестник КРСУ. Киргизия. Бишкек, 2006. С. 5-23.
14. 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 микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн. 2: Микросейсмичность. Петрозаводск: КарНИЦ РАН, 2007. С. 34-47.
15. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Эндогенное излучение разломов на слабоактивных территориях // Активные геологические и геофизические процессы в литосфере. Методы, средства и результаты изучения. Т. II. Воронеж: ВГУ, 2006. С. 293-298.
16. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Хореев В.С., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Патент RU. № 2242033. Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения. М., 2004.
17. Yudakhin F., Kapustian N., Antonovskaya G., Shahova E. Research of geodynamic processes on natural model of block medium / EGU – General Assembly. Venna. Austria, 24-29 April 2006. CD-Rom.