

УДК 550.34:69.02 (575.2) (04)

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСЕЙСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ
И КОНСТРУКТИВНОЙ ЦЕЛОСТНОСТИ ЗДАНИЙ**

Ф.Н. Юдахин – Архангельский научный центр УрО РАН

Н.К. Капустян – Институт физики Земли РАН

Г.Н. Антоновская – Институт физики Земли РАН

Е.В. Шахова – Институт экологических проблем Севера УрО РАН

(Приглашённая работа)

Besides the methodical aspect present work demonstrates experimentally for the first time the existence of nanoearthquakes, described and predicted earlier only theoretically. The opportunity of revealing weak active faults of platforms with use of seismic nanotechnology based on isolation from microseim weak endogenous events with magnitude down to minimum magnitude of about $M \sim -4$ has been shown.

Микросейсмы среднечастотного диапазона 0.5–20 Гц представляют собой достаточно сложный композит из волн разной природы и различного происхождения. Источники микросейсм принято разделять на экзогенные и эндогенные. К первым относятся антропогенные и, в частности, техногенные помехи и природные шумы: от ветра, циклонов, волнения моря и даже грозовой деятельности (оценка последнего была сделана в работе [1]). Эндогенные шумы связаны с внешним для данного участка среды воздействием (сейсмическая эмиссия от лунно-солнечных приливов, землетрясений и взрывов [2, 3]), а также отражают свойства и напряженно-деформированное состояние данного участка, являясь свидетельством неоднородности и энергонасыщенности геофизической среды. Примеры разнообразны: по шумам “видны” рудные тела [4], гидротермальная активность [5], изменение мозаики напряжений в сейсмоактивных районах – шумящие участки среды пространственно дополняют области со слабой сейсмичностью [6], прорабатывают области подготовки естественных [6] и

техногенных землетрясений [7], могут быть особым видом энерговыделения среды (например, вулканическое дрожание [8]).

На примере полевых наблюдений, нацеленных на выявление разрывного нарушения в Архангельской области, представлены два независимых метода анализа, разработанные Институтом экологических проблем Севера УрО РАН (г. Архангельск) совместно с Институтом физики Земли РАН (г. Москва), основанные на двух составляющих микросейсм – техногенной и эндогенной.

Архангельская область располагается на северо-западе Восточно-Европейской платформы и примыкает к юго-восточному склону Балтийского щита, который является наиболее крупным выступом древнего кристаллического фундамента платформы и характеризуется самой высокой сейсмичностью в ее пределах. Согласно историческим и инструментальным данным, в Архангельской области, включая архипелаг Новая Земля, за период с 1467 по 1997 гг. проявилось более 125 землетрясений с магнитудой от 1.0 до 6.3 и глубинами очагов 0–

25 км [9]. Данные С.Б. Николаевой [10] и Lagerback [11], изучавших палеосейсмодислокации на Кольском полуострове в Фенноскандии, указывают на проявление здесь в прошлом землетрясений интенсивностью до 10 баллов.

В соответствии с картой общего сейсмического районирования ОСР-97 [12, 13] на территории Архангельского промышленного узла за 50-летний период с вероятностью 10% интенсивность землетрясения может превысить 6 баллов при среднем периоде повторяемости 500 лет.

Архангельская область по характеру проявления сейсмичности может быть условно разделена на три района [9]: Беломорско-Двинской, Тимано-Печорский и Новоземельско-Пайхойский. Большая часть сейсмических событий сконцентрирована в Беломорско-Двинском районе, причем значительное их количество сосредоточено около города Архангельска и на примыкающих к нему территориях.

Изучая микросейсмы разнообразной природы, можно решать различные инженерно-сейсмологические задачи. Рассмотрим это на нескольких примерах.

Первый связан с проектированием атомной теплоэлектростанции в районе г. Архангельска. Определение места размещения крупных технологических комплексов (АЭС, трубопроводов и пр.) требует детального изучения, особенно выявления разрывных нарушений в земной коре, которые могут сопровождаться подвижками блоков, могущих вызвать аварии на объектах.

Инструментальной информации, однозначно свидетельствующей о наличии или отсутствии разломов непосредственно на участке проведения работ, не было. Однако практически все исследователи указывали на возможное наличие разлома северо-западного простирания к юго-западу от г. Архангельска, но на различных расстояниях от города. 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. большим коллективом исследователей под редакцией В.Г. Трифонова (рис. 1) [14].

Рекогносцировочные полевые наблюдения с целью уточнения местоположения активного разлома проводились с помощью двух одновременно работающих портативных цифровых сейсмометрических станций, перемещавшихся по территории, т.е. в двух точках, разнесенных на расстояния 3–5 км. Регистрация микросейсм велась в полосе 0.5–30 Гц с трехкомпонентной расстановкой (С-Ю, В-З, Z), длительность записи составляла 3 часа. Исходя из сложных условий работы (болота, реки), доступными для наблюдений являлись участки с более плотными грунтами, т.е. вдоль дорог и вблизи освоенных территорий (населенные пункты, пастбища, заброшенные промзоны). Расположение точек позволяет построить сложную пространственную систему, в которой представлены направления как вкрест, так и вдоль предполагаемого разлома.

В качестве источника сейсмических сигналов обычно используются сильные землетрясения или специально созданные искусственные источники (взрывы, вибраторы). В разработанном нами способе, на который получен патент “Способ оценки и выбора участков территории для возведения сооружений различного назначения”, в качестве излучающего источника используются выступающие в рельефе высокие инженерные сооружения (здания, мачты, краны), которые подвержены действию ветра [15]. Даже слабые атмосферные пульсации вызывают колебания сооружений с характерными для них резонансными частотами. Эти колебания “входят” в геологическую среду и распространяются на значительные расстояния, где они “узнаваемы” по значению резонансной (собственной) частоты. По существу, колеблющиеся под действием ветра здания и сооружения являются своеобразным источником, освещающим земную кору, причем источник излучает всегда и бесплатно, что важно для производства работ.

СЕЙСМОЛОГИЯ И ГЕОМЕХАНИКА

При микросейсмическом обследовании Приморского района Архангельской области

было отмечено, что в одной из точек на записи доминируют колебания, возбуждаемые при

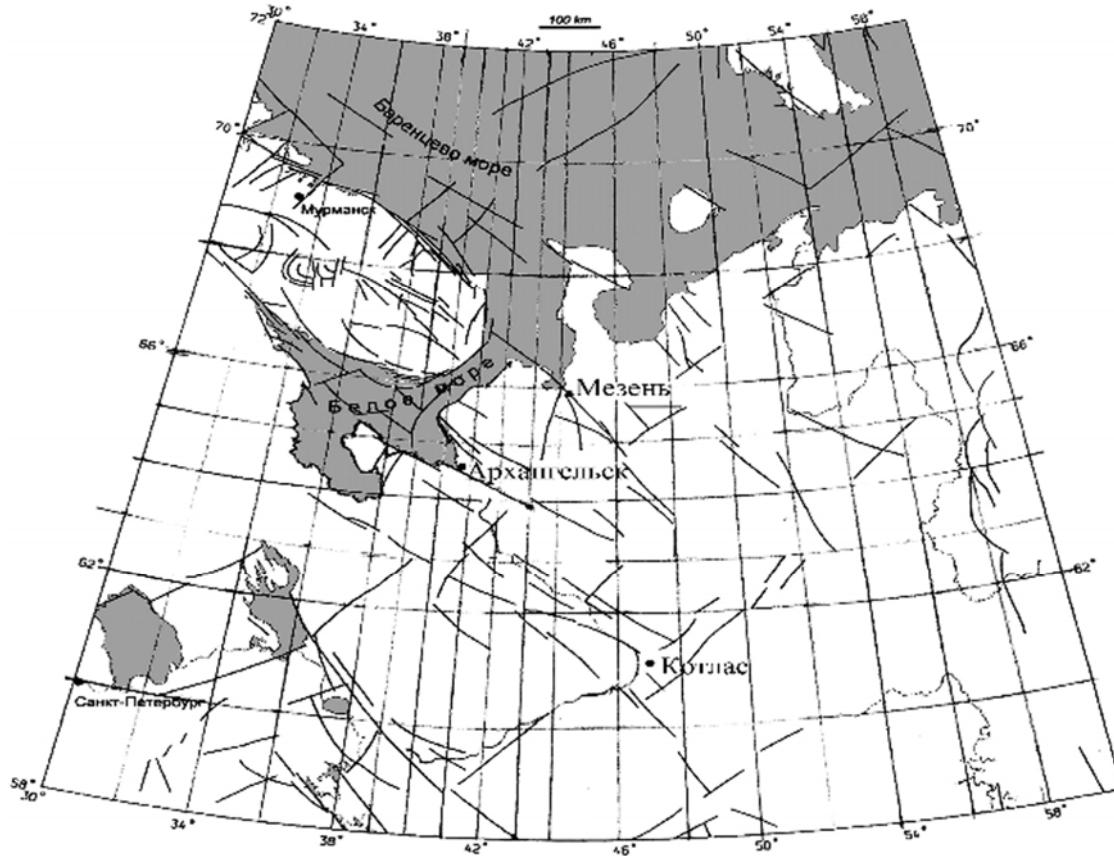


Рис. 1. Карта активных разломов северной части Восточно-Европейской платформы [14].
(Составили: Б.А. Ассиновская, Д.И. Гарбар, О.Л. Грачева, Н.К. Дмитриева, Т.П. Иванова, А.И. Кожурин,
В.Н. Кубишев, Н.А. Мальшев, П.А. Пустоветова, Л.И. Соловьева, Г.П. Щербинина.
Под ред. В.Г. Трифонова).

ветровых воздействиях на систему порталных кранов, расположенных на берегу реки Северная Двина. Эти колебания мы использовали для построения системы наблюдения с просвечиванием среды. Сейсмические сигналы от собственных колебаний 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 фильтрации.

Для просвечивающих среду собственных колебаний оценку амплитуд, характерных для

каждой точки наблюдений, можно производить по-разному. Для первого способа требуется, по меньшей мере, две станции; одна расположена вблизи источника. Для достаточно длительных наблюдений определяют временные изменения амплитуд в каждой точке, затем производят операцию свертки кривых для удаленной точки и пункта вблизи источника. Этот подход очень чувствителен к таким помехам, как всплески амплитуд, связанным, например, с проехавшей машиной.

Другой способ существенно проще и допускает наблюдения даже с одной станцией. Проводят определения значений амплитуд

соответствующего спектрального пика на длительном участке записи (например, 3 часа). Затем строят распределения значений амплитуд (рис. 2). Видно, что распределения нормальные, в качестве значений амплитуд, характеризующих точку, можно принять медианные значения.

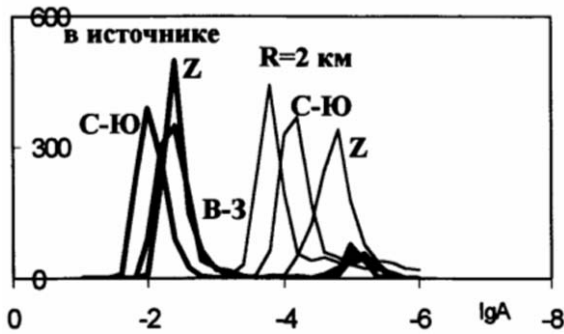


Рис. 2. Распределения значений амплитуд сейсмических сигналов, $f=5.2$ Гц.

Колебания системы порталных кранов представлены в спектре мощности микросейсм в виде первой и второй гармоник – 5.2, 10.4 Гц. Результаты спектрально-временного анализа (СВАН-диаграммы) записей микросейсм, полученных в точках, находящихся на разных расстояниях от источника, показали, что в одних точках собственная частота источника 5.2 Гц прослеживается явно, а в других, хотя и находящихся 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 частотах 5.2 и 10.4 Гц. Для разных точек наблюдений это позволило составить пространственную картину распространения сигнала. По медианным значениям амплитуд были построены карты пространственного распределения амплитуд для Z, N-S, E-W компонент. Учет амплитудной кривой позволил произвести вычитания из экспериментальных карт тренда, определяемого законом ослабления амплитуды с расстоянием (рис. 3).

Учет тренда дает более равномерную картину пространственного распределения амплитуд, на которой еще более отчетливо

выделяется темная полоса, соответствующая повышенному поглощению просвечивающих среду колебаний.

Полученная карта выявляет зоны повышенного поглощения сигнала (темная область, рис. 3) и хорошо согласуется с данными о присутствии разрывного нарушения. Таким образом, следующий шаг – определение природы указанной зоны.

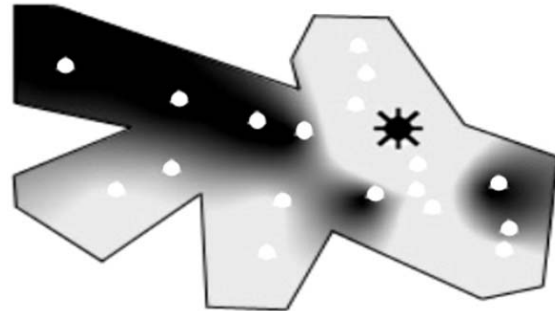


Рис. 3. Карты медианных значений амплитуд с учетом тренда, определяемого законом ослабления амплитуды с расстоянием.

В платформенных районах исходными данными для анализа сейсмичности является эндогенное сейсмическое излучение, представленное микросейсмными и слабыми событиями, называемыми 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 микросейсм (разброс зависит от точки и времени суток) [16, 17], импульсные события примерно на два порядка превосходят фон. Динамический диапазон меньше, чем в сейсмоактивных районах, но чувствительность каналов к регистрации слабых сигналов должна быть больше.

Для локации таких слабых (в сейсмологическом понимании) импульсных сигналов обычно используют либо очень плотную сеть датчиков, что невозможно повсеместно, либо ведут наблюдения микрогруппами с малым разносом сейсмометров (в сотни метров) [1, 18]. Как видим, актуальным является вопрос о более технологичном и дешевом способе

обследования территорий для выявления потенциально возможных разрывных нарушений.

Анализ временных последовательностей всплесков мощности микросейсм показал, что слабое эндогенное сейсмическое излучение встраивается в иерархическую сетку [19]. Это позволяет оценить параметры графика повторяемости. Таким образом, статистический анализ записей микросейсм дает возможность за достаточно короткий временной интервал получить те сведения, которые по сильным событиям требуют десятилетий регистрации.

В качестве параметра, характеризующего распределения по энергиям сейсмического излучения, использовалась оценка функции когерентности $K(f)$ записей вертикальной и горизонтальной компонент. Вкратце повторим: методика основана на том, что записи разных компонент – это разложение по осям регистрации вектора колебаний в данной точке. Для сигнала из ограниченной области колебания будут когерентны, величина $K(f)$ зависит от соотношения мощностей сигнала S и фона N , $0 < K(f) < 1$ в частотной полосе сигнала. Для шума, собираемого со всего объема, $K(f) = 0$.

Расчет когерентности в скользящем временном окне $K(f, t)$ (когерентно-временной анализ – КВАН) и анализ получаемых полей позволяют выделить частоты, на которых излучается сейсмический сигнал из локальной области в среде. Сечение КВАН-диаграммы на этих частотах, 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 – не более размера $R \approx \lambda Q$ (λ – длина волны, Q – добротность среды) [16]. Получение “каталога” позволяет построить по нему аналог графика повторяемости для очень слабых событий. Схема, основанная на анализе КВАН-диаграмм, является другой возможностью реализации идеи сейсмологии микромасштаба, ее преимущество по сравнению с работами [19] состоит в том, что удается отсеять часть помех, связанных с

движущимися источниками сигналов. Данная технология выделения слабых событий подробно описана в [20].

Таким образом, разработанная методика позволяет выделять полезные сигналы ниже уровня помех и регистрировать землетрясения с магнитудами $M = -4 \div -5$, которые ранее предсказывались только теоретически. Данная методика разработана по результатам экспедиционных работ 2003–2004 гг. на территории Архангельской области.

Перейдем к анализу эндогенного излучения. На рис. 4 приведена подборка кривых (аналогов графика закона Гутенберга-Рихтера) для всех точек наблюдений по широтному и меридиональному сечениям среды. Видно, что для частотного среза 17.4 Гц наибольший разброс кривых и наименьший наклон графиков b характерен для широтного направления, что отражает уровень геодинамической активности и степень дифференциации среды. В меридиональном направлении ситуация более “спокойная” и близкая к таковой для частоты 2.2 Гц, т.е. более крупных (на порядок) блоков среды.

Согласно [21], принятые значения частот соответствуют X и VIII рангам нарушений, т.е. размерам блоков в несколько километров и 100–200 м соответственно. Отметим, что раздробленность верхней части земной коры района по геофизическим данным характеризуется блоками в десятки километров, т.е. рангами XII и более. Иерархические структуры, на которые нацелены работы по исследованию эндогенных микросейсм, позволяют получать представления о геодинамике структур, доступных лишь очень детальным сейсморазведочным работам.

Конкретные значения частот были выбраны на первом этапе работ в 2003 г., исходя из того, что эти значения не являются преобладающими частотами в эндогенном микросейсмическом излучении в точке наблюдения, т.е. точки равноправны; данные по всем точкам могут быть приняты с одинаковым “весом”. Эти же значения оказались удачными и для новых точек наблюдения, добавленных в систему в 2004 г.

На рис. 5а и 6а представлены карты: интенсивности глубинного эндогенного сейсмического излучения, характеризуемого количеством микроимпульсов, и анизотропии распределения микроимпульсов в меридиональном и широтном направлениях (рис. 5б, 6б). Обрез карт соответствует разрешающей способности системы наблюдений, включающей точки регистрации в 2003 и 2004 гг. На карты нанесены: линия левого берега устья Северной Двины, центр г. Архангельска (звездочкой) и зона предполагаемого разлома по результатам просвечивания среды (рис. 3).

Карта интенсивности сейсмического эндогенного излучения в низкочастотной области (рис. 5а) показывает, что область достаточно однородна, а всплески интенсивности (серые участки, указанные белыми стрелками) соответствуют территориям, имеющим береговую линию, открытую для ветрового приboя. Это, в первую очередь, побережье Белого моря (о. Ягры, северо-западный фрагмент карты), затем субширотный участок устья реки Северная Двина (западный фрагмент). Все эти зоны совпадают с зоной раздробленности; таким образом, эндогенное излучение на низких частотах в этой зоне может инициироваться микроподвижками, возникающими в разломе вследствие воздействия приboя с поверхности. Существенно, что подобное инициирование сейсмичности малыми воздействиями наблюдалось неоднократно именно на разломах, причем как в натуре, так и на физических моделях.

Еще одно пятно повышенной интенсивности излучения выделяется в центральной части карты на рис. 5а, т. В. Оно имеет вытянутую субмеридиональную форму и несколько сдвинуто к западу относительно выделенного ранее короткого сегмента разлома. Возможно, его природа связана также с разрывным нарушением, но идущим вкрест основному разлому. Именно эти направления присутствуют на карте разломов [14]. Несовпадение пятна с обсуждаемым направлением может быть связано с тем, что при сдвиговых деформациях, которые могут быть на разломе, очаги микроимпульсов расположатся не на линии разлома, а на линиях под углом к нему. Величина угла определяется свойствами среды, в том числе модулем сдвига.

Местоположение отмеченных территорий позволяет предположить, что эндогенное излучение генерируется двумя факторами: оно высвобождается волнением на акватории и приboйными эффектами и геодинамическими подвижками по разрывам.

Области наиболее интенсивного излучения отмечены стрелками: белыми – по данным 2003 и 2004 гг., черными – по данным 2004 г. Все области либо совпадают по местоположению, либо закономерно связаны с ранее выделенной зоной раздробленности.

На рис. 5б представлены карты анизотропии эндогенного излучения – соотношение количества импульсов в меридиональном и широтном вертикальных сечениях разреза. На

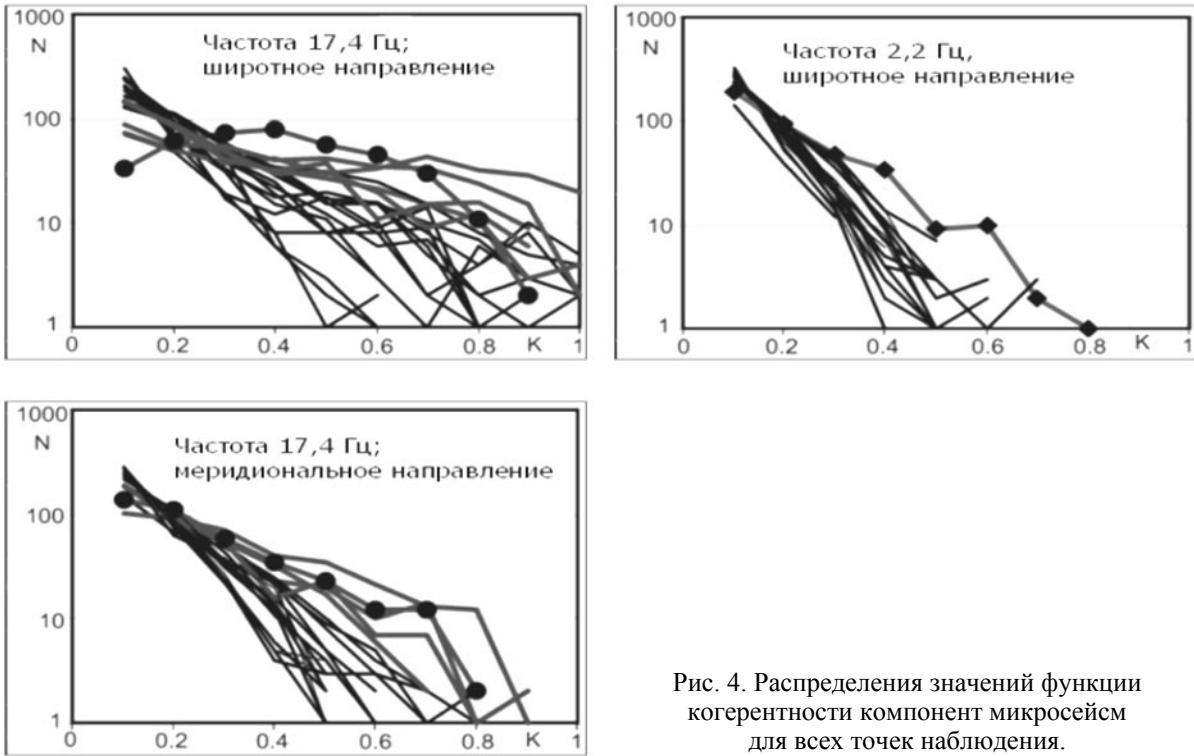
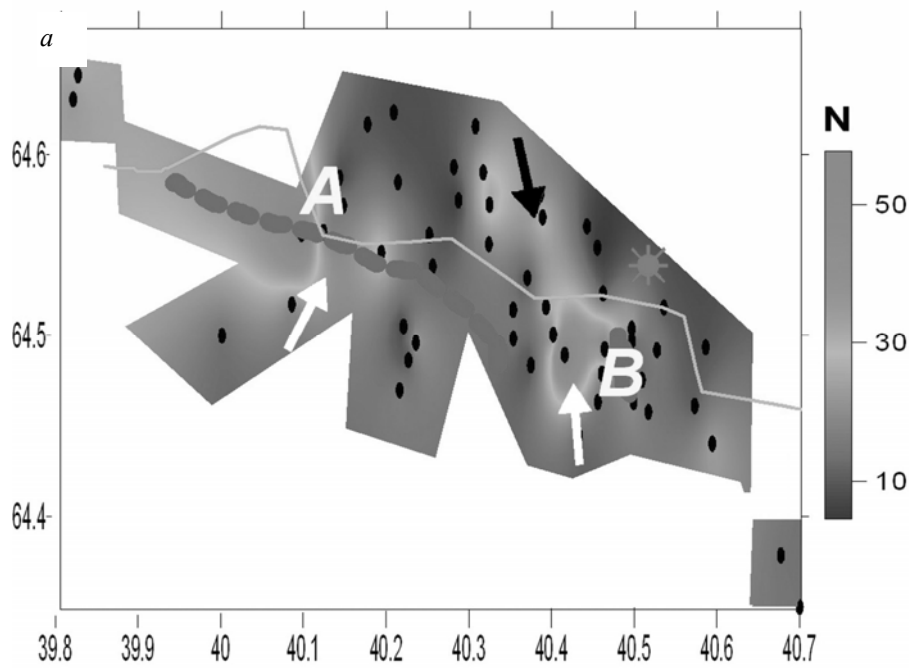


Рис. 4. Распределения значений функции когерентности компонент микросейсм для всех точек наблюдения.



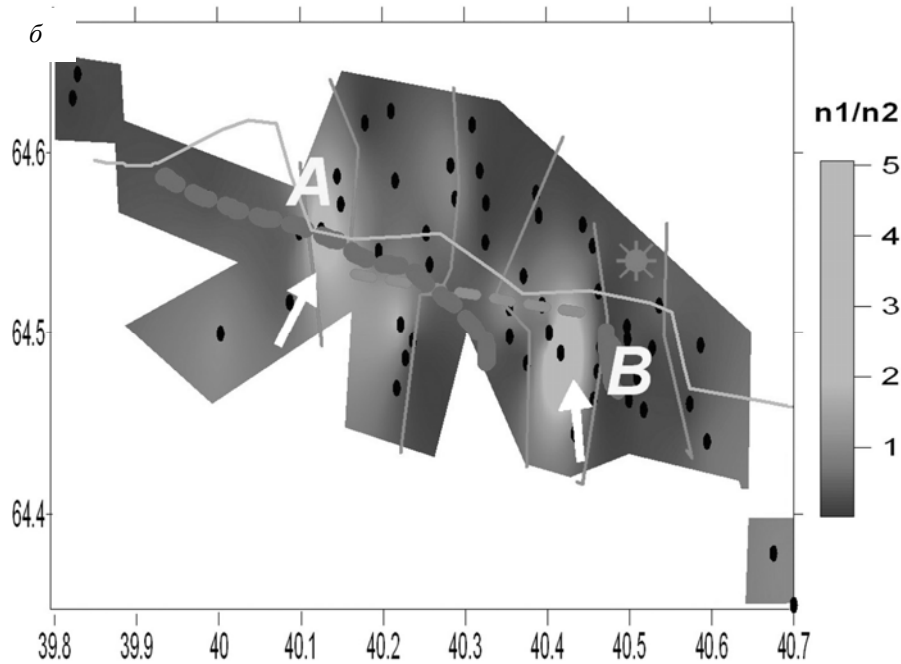


Рис. 5. Карты эндогенного сейсмического излучения для частоты 2.2 Гц:
а – интенсивности; б – анизотропии.

карте линиями отмечены участки смены направления доминирующего излучения. Видно, что карта разбита на несколько блоков, причем основное несогласие их границ совпадает с зоной раздробленности, выявленной ранее. Следует отметить значительно большую раздробленность среды на северо-восток от разлома по сравнению с юго-западной частью карты. Белыми стрелками отмечены наиболее ярко выраженные участки анизотропии излучения, сопровождаемые также линиями смены направления. Отмеченные стрелками участки совпадают с ранее выделенной зоной раздробленности.

Важно отметить, что линии, разделяющие участки смены направления излучения могут не совпадать с разрывом. В том случае, если разрыв является активной структурой с местоположением очагов в плоскости разрыва, то линия смены направления излучения не будет, естественно, совпадать с ним. Такой тип излучения характерен для деформаций растяжения-сжатия, подвижек по вертикали или для зон тектонических узлов. Если по

разрыву осуществляется сдвиг, то излучение, как было показано выше, проявляется внутри целикового блока, а смена направлений может оказаться на границе блока, т.е. совпасть с разрывом.

Исходя из моделей деформирования, рассмотрим одну из возможных схем, не противоречащую приведенным экспериментальным данным. В соответствии с картами интенсивности и анизотропии эндогенного сейсмического излучения на частоте 2.2 Гц (рис. 5) сегмент ранее выделенной раздробленной зоны *A* может являться активным разломом не менее *X* ранга, осуществляющим сдвиговые тектонические деформации как в горизонтальном направлении, так и в вертикальной плоскости, причем источник горизонтальных подвижек лежит преимущественно в северо-западном направлении. Сегмент зоны раздробленности *B* – зона преимущественно горизонтальных подвижек, возможно, инициируемых сегментом *A*. Наличие особой точки на

сегменте *A* (отмечено белой стрелкой) может говорить о присутствии тут тектонического узла, т.е. наличии дополнительного разлома в месте пересечения с главным.

На рис. 6а показана карта интенсивности излучения, а на рис. 6б – его анизотропии на частотном срезе 17.4 Гц, т.е. для эндогенной сейсмической активности на более мелком иерархическом уровне. Сравнение этих карт между собой и с аналогичными данными на частоте 2.2 Гц показывает следующее:

- наиболее активным и наиболее детально иерархически проработанным участком на сегменте *B* является зона, отмеченная белой стрелкой, что подтверждает высказанное ранее предположение о наличии здесь тектонического узла; совпадение местоположения зон для частот 17.4 и 2.2 Гц говорит о наличии доминирующего механизма, управляющего здесь геодинамикой;
- для сегмента *B* предполагаемого разлома сдвиг высокочастотного излучения на юг по сравнению с таковым для 2.2 Гц указывает на рассогласование геодинамических процессов на разных иерархических уровнях, что говорит о сложном характере деформирования, свойственном тектоническому узлу. Это же подтверждается несогласием линий смены

направлений излучения на двух картах в этой области (рис. 5б, 6б).

Отмеченные закономерности подтверждают карты параметров *b* (наклона графика закона Гутенберга-Рихтера) для эндогенного сейсмического излучения (рис. 7), которые показывают значительную неоднородность пространственного распределения *b*. Точки с наибольшей активностью излучения ложатся в пределах субширотной линейной зоны (рис. 7б).

Приведенный анализ карт параметров эндогенного сейсмического излучения показывает, что интерпретация данных по эндогенному сейсмическому излучению позволила разделить участки по геодинамической активности и указать наиболее активные. В подтверждение наших выводов мы провели натурный эксперимент. В качестве натурального объекта была исследована морская дамба, соединяющая острова Б. Соловецкий и Б. Муксалма через пролив Южные Железные Ворота (Белое море), строительство ее было закончено в середине XIX в.

Дамба представляет собой поистине циклопическое сооружение из крупных (1 м и более) валунов, переложенных песчано-глиняным наполнением. Длина дамбы составляет около 1 км, высота – 6–7 м, около 2 м находится под

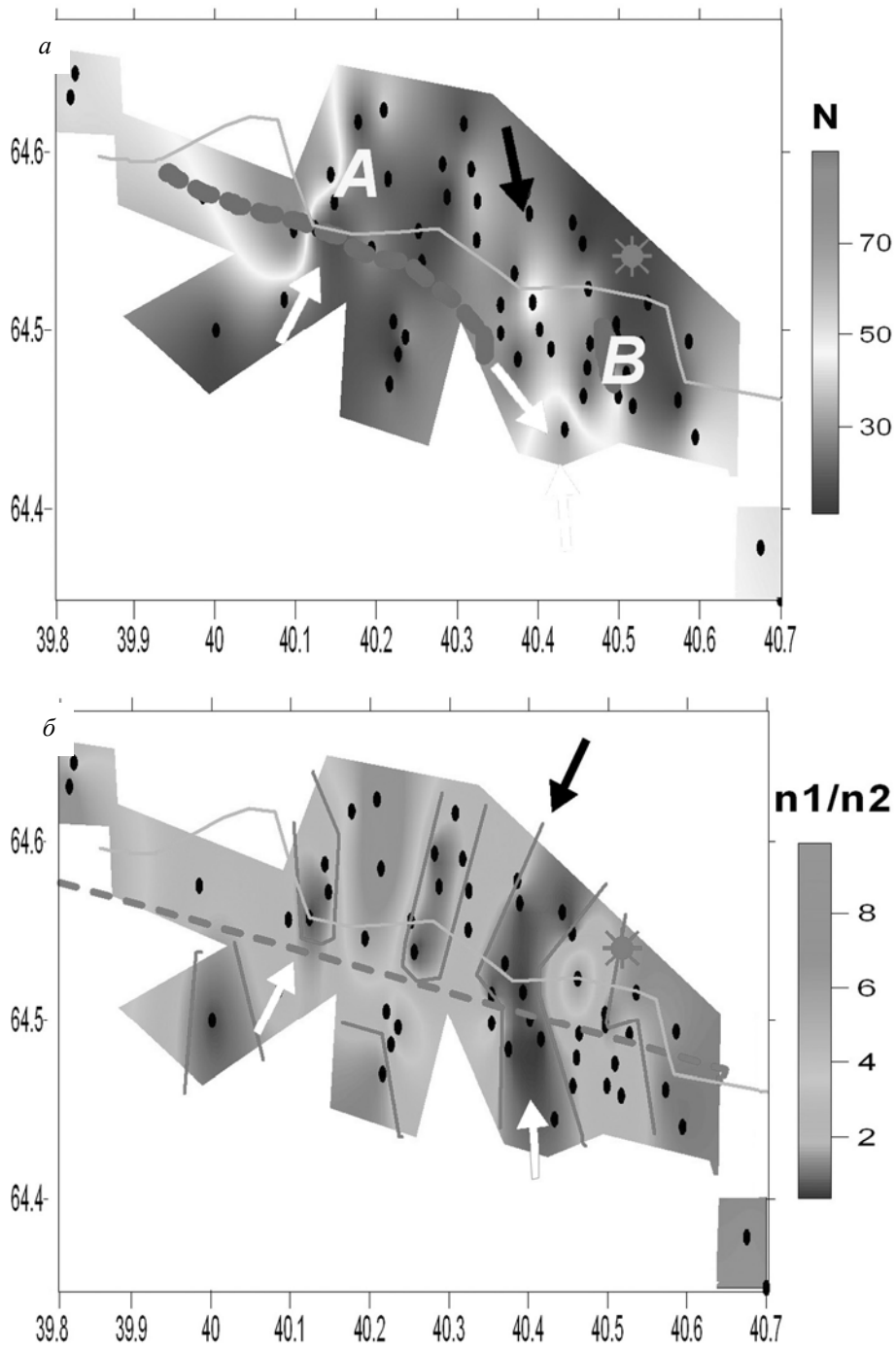


Рис. 6. Карты эндогенного сейсмического излучения для частоты 17.4 Гц:
а – интенсивности; б – анизотропии.

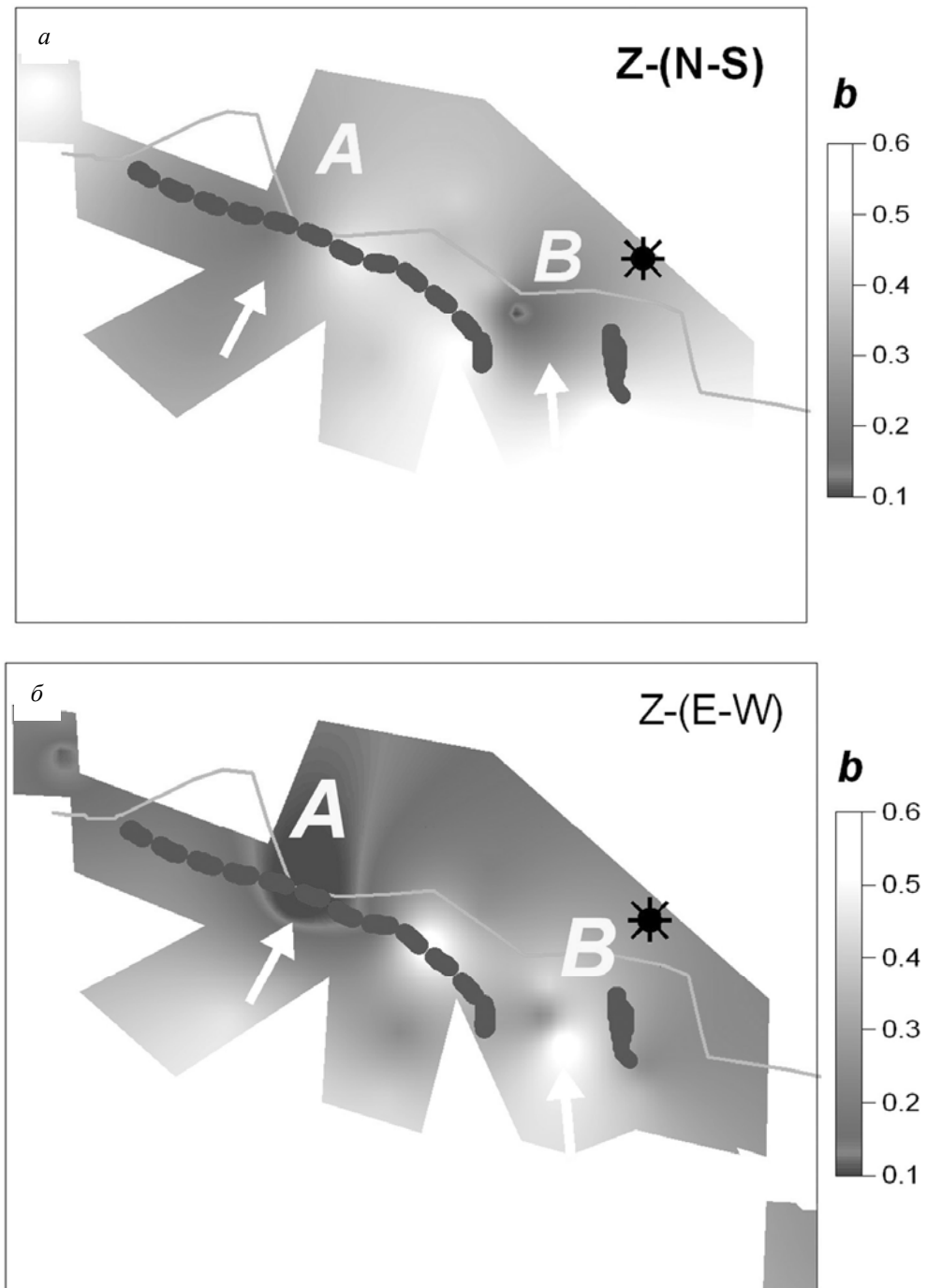


Рис. 7. Карты параметра b эндогенного сейсмического излучения:
а – для меридионального сечения; б – для широтного сечения.

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. Немаловажно, что район дамбы практически необитаем, т.е. отсутствует техногенная компонента как в воздействии, так и в сейсмическом сигнале. Трехкомпонентные сейсмометрические наблюдения велись в центральной части дамбы с помощью малоканальной цифровой баро-сейсмической станции, сейсмометрами СМ-3.

Сравнение данных для разных сечений (Z-X, Z-Y) показывает их различие, т.е. методика чувствительна не только к величине воздействия, но и к направлению. Суммирование данных для двух ситуаций – подъема и спуска воды (рис. 8) – подчеркивает отмеченную закономерность.

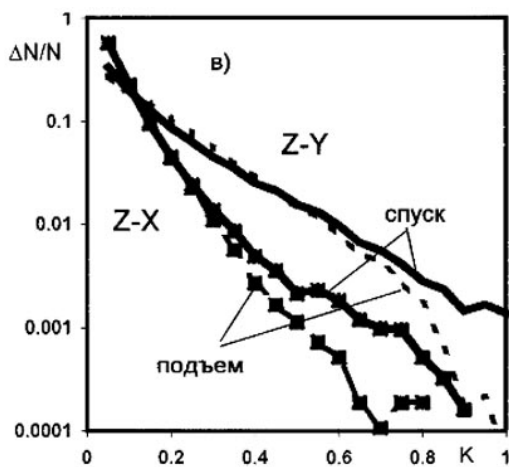


Рис. 8. Распределения функций когерентности для пар Z-X и Z-Y на суммарных интервалах подъема и спуска воды.

Из результатов работ на натурной модели, имитирующей природную блоковую среду, следует, что точечные малоканальные сейсмометрические наблюдения с использованием анализа эндогенного излучения позволяют выявить

геодинамические процессы, вызванные слабыми изменениями полей напряжений. Данный эксперимент можно рассматривать как своеобразную калибровку методики оценки состояния и свойств блоковой среды, пригодной для поиска разрывных нарушений и мониторинга их активности.

Второй пример показывает возможность использования микросейсм для инженерно-сейсмологических задач, в частности, проведение сейсмического микрорайонирования на территории г. Архангельска.

Как известно, геологическая среда крупного города активно изменяется под влиянием инженерно-строительной и хозяйственной деятельности. Сам процесс преобразования геологической среды интенсивнее протекает на территории, где воздействия человека на природу весьма многообразны и значительны, и чем более крупный, древний и индустриальный город, тем существеннее изменяются такие основные компоненты геологической среды, как рельеф, грунты основания, грунтовые и подземные воды, а также современные геологические процессы и явления. Эти компоненты определяют инженерно-геологические условия строительства, хозяйственного использования городских территорий, эксплуатации зданий и сооружений [22].

При проектировании и строительстве необходимо считаться с особенностями геологической среды и тем более учитывать ее изменение под влиянием деятельности человека. Город, как сложившаяся историческая природно-техническая система, изменяет рельеф, природный ландшафт, состояние и свойства грунтов основания, существенно изменяет подземную гидросферу, условия питания, залегания, уровневый и химический режимы подземных вод. Зачастую строительство жилых массивов в Архангельске производилось по локальным изысканиям, которые не учитывали влияние данной застройки на прилегающие исторические природно-технические системы, а главное, не принимали в расчет изменение гидрогеологического и гидрологического режимов района и геологической среды. Уже

давно назрела настоятельная необходимость инженерно-геологического, инженерно-экологического картирования изменения геологической среды города. Это же диктуют и запросы градостроительной практики. В современных условиях производить инженерно-геологические и экологические изыскания без учета и прогноза изменений геологической среды и ее рационального использования просто немыслимо, тем более разрабатывать генеральный план развития города [22].

Колебания инженерных сооружений, раскачиваемых ветром, можно использовать для построения карты микрорайонирования территории города. Городской организм представляет собой сложное единство трех компонентов: природной среды, техногенных объектов и населения. Взаимодействия между этими компонентами весьма разнообразны и в целом определяют механизм формирования и развития градостроительной системы во времени. В условиях стихийного бедствия происходит изменение как состояния каждого из трех компонентов, так и характера их взаимодействия.

Классические способы расчета балльности для исследуемой территории описаны в [23]. Главные требования: наличие сильных землетрясений, не менее трех стационарных сейсмических станций. Это трудоемкие и дорогостоящие работы, к тому же просто невыполнимые в асейсмичных районах. Данные работы можно проводить с помощью мощных вибраторов [24], но в городских условиях они имеют ряд ограничений.

Мы нашли довольно простой способ для решения данной проблемы. Вместо сильных землетрясений и вибраторов можно использовать колебания высотных сооружений, которые постоянно излучают в среду сейсмический сигнал. Это бесплатный источник сейсмических волн, которые можно регистрировать до десятков километров. Обследуемую территорию можно пройти последовательно по набору намеченных точек, используя даже одну сейсмическую станцию типа КБС-2.

Продемонстрируем это на примере центральной части г. Архангельска. За

источник сейсмических сигналов было выбрано высотное 24-этажное здание. Это уникальное сооружение города – самое высокое здание, очень простое конструктивное решение. За основу была выбрана инженерно-геологическая карта масштаба 1:50000, на которую были нанесены точки исследования. Работы проводились в конце мая, регистрация в каждой точке – не менее 1 часа.

Методика обработки. Выделялся сигнал на частоте колебания высотного сооружения. Оценив медианные значения распределения амплитуд на частоте пика для разных точек наблюдений, можно вычислить ускорения для выбранных точек. За средний грунт для наших условий был выбран торф плюс насыпной грунт. Произведено вычисление отношения ускорения к найденному значению для среднего грунта. Зная, что увеличение ускорений в 2 раза равно приращению в 1 балл, можно построить карту приращения балльности территории города Архангельска (рис. 9а). Полученный результат хорошо согласуется с инженерно-геологической картой. В строительной науке при планировании строительства инженерного сооружения пользуются значениями ускорения (в долях g); балл – это грубая оценка сейсмичности территории, в отличие от ускорения. Из-за редкой сети наблюдений мы кружками (для большей наглядности) нанесли значения долей g в точках исследования, интервалы разбиения представлены тоновой палеткой (рис. 9б).

Для построения карты микрорайонирования всего города необходима более густая сетка точек исследования. Таким образом, предложен еще один вариант проведения микрорайонирования территории городов.

Изучая микросейсмические колебания здания можно судить о его конструктивной целостности. Любое здание представляет сложную конструкцию, количественную оценку работы которой, даже в простейшем случае статического воздействия равномерных вертикальных нагрузок, можно произвести пока только приближенно, с более или менее серьезными отклонениями от действительных условий работы сооружений.

Анализ работы сооружения значительно осложняется в случае действия на него неравномерных нагрузок и неравномерных деформаций основания, даже при условии, что деформации носят статический характер, и, тем более, когда возникает необходимость

считаться с особенностями динамического воздействия. Приближенность расчета связана не только с упрощениями расчетных схем по сравнению с действительными конструкциями, но и с расчетными сопротивлениями.

а



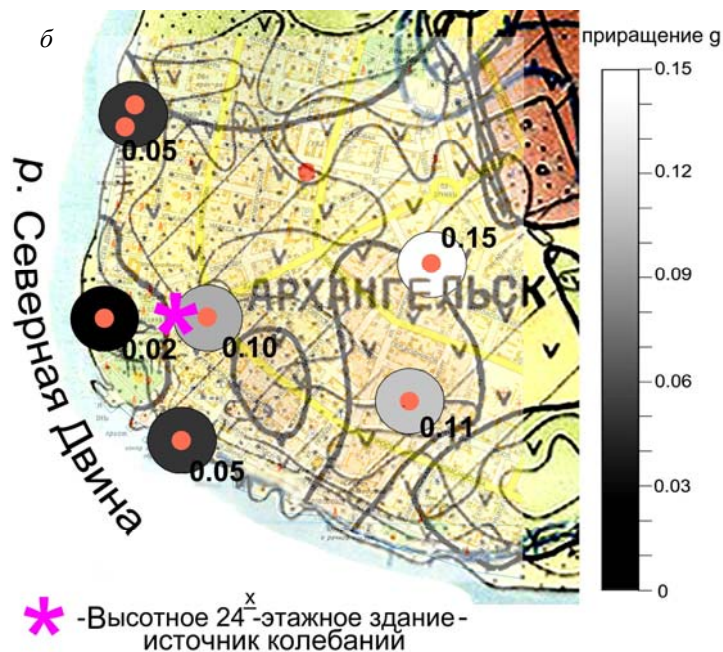


Рис. 9. Карты-схемы для центральной части г. Архангельска:
а – приращения балльности; б – ускорений в долях g.

При проектировании и строительстве помимо особенностей геологической среды следует учитывать ее изменение под влиянием деятельности человека. Помимо сейсмических и ветровых воздействий, учитываемых СНиП, на реальное здание действуют слабые колебания разнообразной природы – от инженерных коммуникаций, транспорта и пр. Нормами ограничивается допустимый уровень создаваемых ускорений, детальный анализ колебаний – источников, дальнего действия, временного хода – практически не ведется. Это существенное упущение, так как реальные воздействия не “участвуют” в расчетах, что проявляется, например, в различиях измеряемых и расчетных ускорений. Существенными вопросами инженерных решений сейчас становятся вопросы расчета усталостных явлений, причем как строительных материалов, так и грунтов. Особенность проблемы состоит в том, что “работающие” здесь явления многоциклового усталости для слабых и долговременных воздействий (более 10^9 циклов) практически не изучены [3].

Таким образом, проблема введения в расчетную схему слабых природных и техногенных вибровоздействий порождает круг задач, основой для которых является получение экспериментальных данных о динамике зданий, взаимодействии здания с грунтом.

Строительство и эксплуатация крупных многофункциональных комплексов, высотных зданий, архитектурных памятников требует постоянного обследования состояния объекта. Раньше данные работы выполнялись для промышленных и специальных сооружений, а в настоящее время применяются для зданий гражданского назначения. Рассмотрим несколько примеров обследования аварийных сооружений на примере жилого дома и Белой башни Соловецкого монастыря путем оценки собственной частоты колебания данных сооружений.

Исследование разрушенного здания. Предложенный выше способ был опробован на здании в г. Архангельске, где взрывом газа был практически полностью разрушен крайний подъезд. Измерения проводились на

грунте вблизи аварийного дома, на первом и девятом этажах соответственно [25, 26]. Длительность регистрации во всех случаях – 1 час, маятники располагались по продольным и поперечным осям плана здания.

Были построены спектрально-временные диаграммы (СВАН) для аварийного здания. Их анализ показал следующее. Сигнал на частоте 1.9 Гц увеличивается с этажностью, т.е. это собственная частота колебания здания. Для сравнительного анализа было исследовано целое здание такого же конструктивного решения, стоящее напротив. Сравнение СВАН-диаграмм вертикальных компонент (Z) разрушенного здания (нижняя диаграмма) и стоящего напротив целого (верхняя диаграмма) говорит об отсутствии сигнала на частоте 1.9 Гц на девятом этаже для аварийного здания (рис. 10).

На рис. 11 приведено сравнение спектров мощности указанных выше зданий. Отчетливо видно практически идеальное наложение спектров мощностей на горизонтальных компонентах. Анализ вертикальных компонент показывает отсутствие пика, соответствующего собственной частоте колебания исследуемого пострадавшего здания.

Из этого можно сделать вывод, что в разрушенном доме нарушены прочные связи между строительными конструкциями и перед заселением он нуждается в существенном укреплении.

В 2004 г. была начата программа исследования архитектурных памятников Соловецкого архипелага. На примере Белой башни Соловецкого монастыря была разработана методика сейсмометрического обследования архитектурных памятников. Для точечных сейсмометрических наблюдений использовали автономные портативные 3-компонентные (N-S, E-W, Z) сейсмические станции, ведущие регистрацию на компьютер-ноутбук [27]. Одна станция была снабжена стандартными сейсмометрами СМ-3, другая – КМВ. Сейсмометр КМВ был разработан в ИФЗ РАН по техническому ИЭПС УрО РАН. Сейсмометр КМВ, небольшой по размеру и весу, не требует специальной настройки (как СМ-3) и позволяет провести измерения практически в любой точке здания. Все это существенно отличает его от СМ-3. Поэтому в работах расстановку с использованием СМ-3 производили внизу, а КМВ перемещался по зданию.

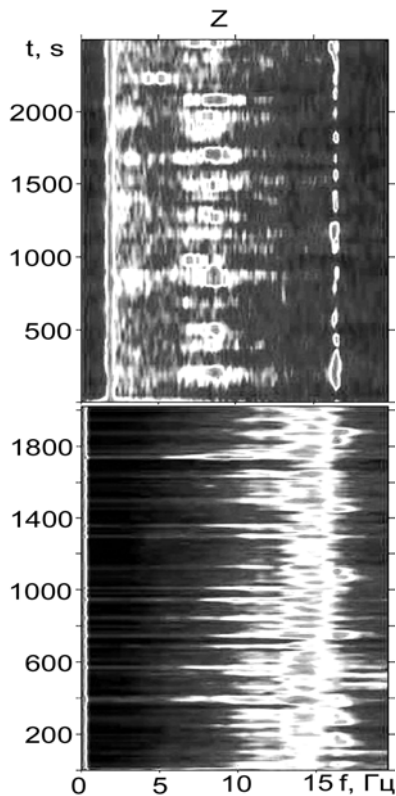


Рис. 10. Спектрально временные диаграммы вертикальной компоненты (Z) целого (верхняя диаграмма) и разрушенного (нижняя диаграмма) зданий.

Перед началом работ производили взаимную калибровку каналов. Для каждого направления сравнивали пары: СМ-3 и КМВ. Также приводили сопоставление спектров записей СМ-3 в сходных условиях, но разных точках – в Святительском корпусе и в Белой башне.

Схема наблюдений на Белой башне. Одна станция с сейсмометрами СМ-3 была расположена на нижнем ярусе башни (уровень земли), на плоском камне в бойнице под точкой а – бойницей верхнего яруса. Вторая станция с сейсмометром КМВ была расположена на верхнем ярусе, и последовательно велись наблюдения во всех 8 бойницах (на камнях-подоконниках). Сейсмометрические наблюдения производили одновременно двумя микросейсмическими станциями в близких точках. Регистрацию вели в тихое время, в условиях минимальных

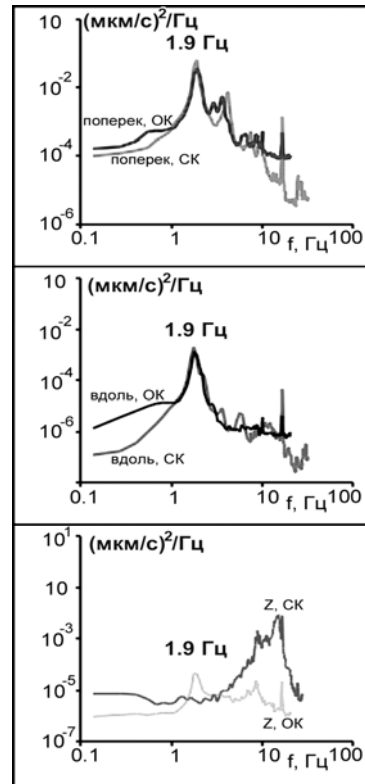


Рис. 11. Спектры записей в разрушенном доме и соседнем целом (этот же проект) на 9 этажах, где СК – Советские Космонавты, ОК – Обводный канал.

антропогенных помех, в дневное время – в течение двух дней. В разные дни отдельные точки повторялись, получены сходные спектры.

Сравнивали данные по вертикали – для точек нижнего и верхнего ярусов. Отмечено, что пики в спектрах на разных уровнях Белой башни находятся на разных частотах, причем ни одна из частот не совпадает. Это очень странный факт, который мы практически не видели на зданиях в г. Архангельске и г. Москве [28]. Такая ситуация возможна в том случае, когда колебания снизу не передаются наверх, и наоборот, т.е. в теле башни присутствует своеобразный “гаситель” колебаний или аналог антисейсмического пояса.

Спектры колебаний, полученные в разных точках верхнего яруса сейсмометром КМВ, подобны, пики в спектрах устойчиво

присутствуют на всех компонентах, их уровень несколько меняется от точки к точке. Значения частот наиболее интенсивных пиков округленно: $F_1=8.9$ Гц, $F_2=17.6$ Гц, $F_3=26.7$ Гц, т.е. с учетом точных значений $F_2=2F_1$, $F_3=3F_1$. Такие соотношения, а также величины частот и их постоянное присутствие именно на верхнем ярусе башни указывают на то, что это собственные частоты сооружения.

Как известно, колебания сооружения на собственных частотах возникают вследствие многих причин – воздействий штормовых и техногенных микросейсм, сейсмических событий, в том числе промышленных взрывов, порывов ветра и прочее. Как показывают наблюдения, микроколебания зданий на собственных частотах происходят постоянно, что позволяет использовать это для контроля за состоянием зданий [29]. Существенно, что значения собственных частот зданий определяются конструктивной схемой и состоянием сооружения, т.е. колебания на собственных частотах – строго монохроматические, что позволяет их выявлять спектральным анализом даже при очень малой амплитуде (вплоть до сотых микрон) [28].

Производя выделение пиков в спектре микросейсм можно определить амплитуды колебаний на собственных частотах. Интересным представляется определение амплитуд колебаний по трем координатным осям в точке наблюдений (N-S, E-W, Z), что позволяет восстановить характер движения точки здания. Сравнение движений в разных точках позволяет судить о напряженно-деформированном состоянии сооружения, причем резкая смена характера движения может указывать на нарушения в материале, в том числе трещины. Сопоставление картин, полученных для разных значений собственных частот, – основного тона и более высокочастотных гармоник первого и высших тонов – показывает подразделение сооружения на блоки разного размера, что важно для определения размеров трещин и их проницаемости.

Следуя этой логике, была произведена обработка спектров, полученных для разных бойниц верхнего яруса Белой башни, результаты которой представлены на рис. 12 в

виде полярных диаграмм [25, 26]. Отсюда следует:

- на низких частотах (основной тон) колебания примерно одинаковы для всех точек, т.е. конструкция башни работает как единое целое, некоторая асимметрия связана, по-видимому, с более слабыми грунтами в юго-западной части основания;
- для следующей гармонике наблюдается заметная асимметрия в горизонтальной плоскости, связанная с влиянием пристроенного корпуса, что отражено на схеме рис. 12;
- картина для третьего тона характеризуется изрезанностью, что может говорить о частичном нарушении целостности сооружения.

Ориентируясь на колебания в горизонтальной плоскости как наиболее информативные для выявления нарушения целостности, на рис. 12 построены для каждой точки и каждой частоты диаграммы-ромбы, в которых по горизонтали отложены амплитуды собственных колебаний в направлении север-юг (N-S), по вертикали – в направлении восток-запад (E-W). Учитывая ориентировку башни, показанную на схеме рис. 12, по форме диаграмм-ромбов удобно судить о смене характера колебаний. Отчетливо видны следующие особенности:

- на низкой частоте основного тона некоторое уменьшение размаха колебаний обусловлено стеной монастыря (у точки *a*) и наличием контрфорсы между точками *a* и 1;
- для второго тона различия колебаний в точках значительные: в точке *a* – малые, затем увеличенные в точке 1; затем следует смена преимущественного направления колебаний (от точки *b* к точке 2 и *c*); в точке 3 ситуация та же, что и в точке 1; затем – повышенные значения в точке *d*. Смена направлений колебаний происходит между точками 1 и *b*, *c* и 3, 3 и *d* – все они отмечены на схеме-плане башни как места возможных трещин. Отметим, что, так как траектории в точках 1 и 3 подобны, то трещины не развиты на всю высоту башни;
- аналогичный анализ ситуации для третьего тона позволил нанести на план трещины более мелкого масштаба. Следует отметить

заметные амплитуды колебаний для точек 4 и а; сопоставления с результатами анализа для второй гармоники показывают, что тут, по-видимому, играют роль колебания верхнего яруса либо шатра.

Рекогносцировочные наблюдения, выполненные на Белой башне, показали эффективность выявления нарушений конструктивной целостности сооружения. Кроме того, получены

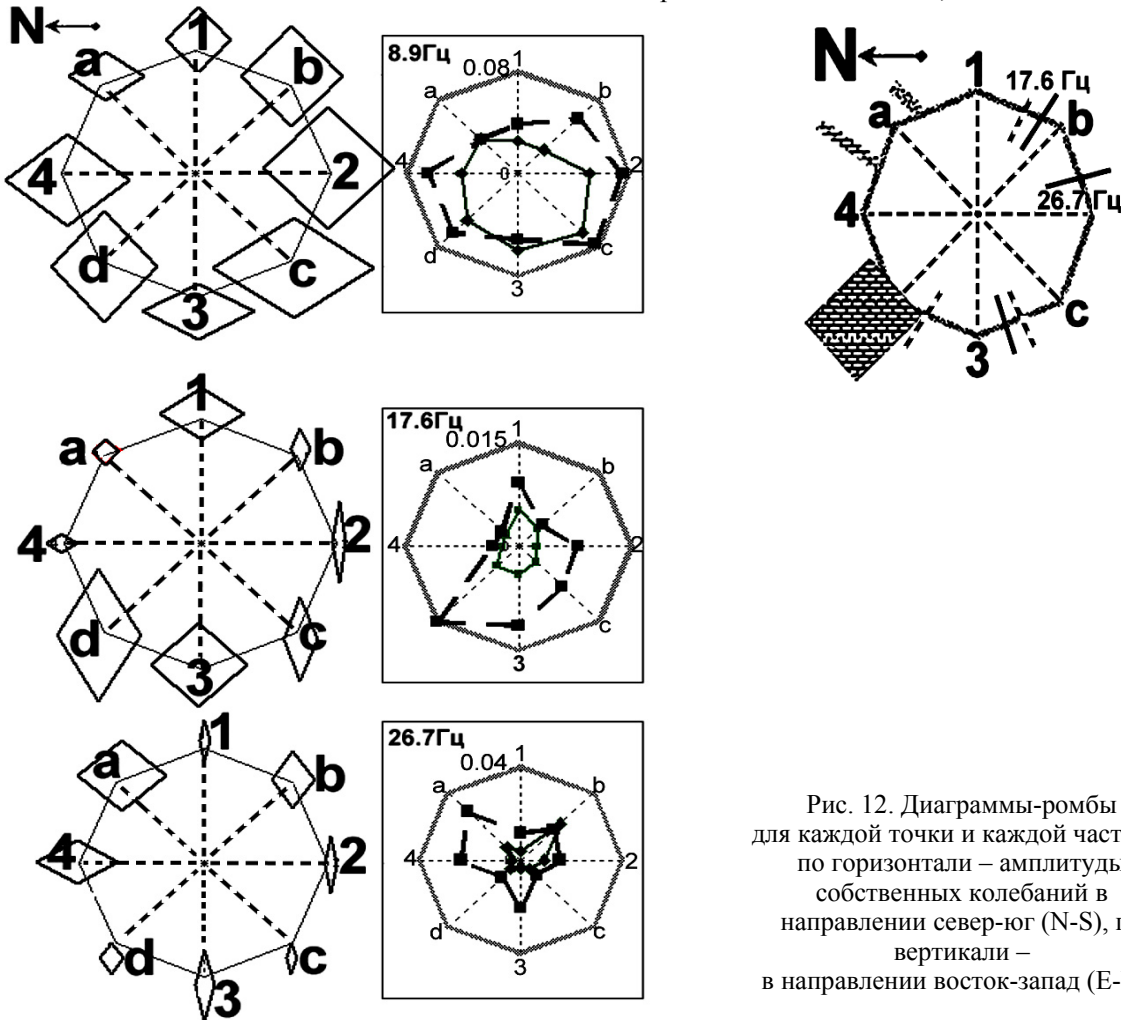


Рис. 12. Диаграммы-ромбы для каждой точки и каждой частоты, по горизонтали – амплитуды собственных колебаний в направлении север-юг (N-S), по вертикали – в направлении восток-запад (E-W).

ны интересные и в некоторой степени неожиданные свидетельства о сейсмической развязке сооружения с основанием. Привлечения данных малоуглубинной сейсморазведки [30] подтвердили сделанные нами предположения.

Таким образом, использования собственных колебаний инженерных сооружений позволяют решать разные геофизические задачи:

- картировать геологическую среду, в том числе выявлять разрывные нарушения;
- оценивать состояние грунтов;
- строить карты сейсмического микрорайонирования городов;
- обследовать конструктивную прочность зданий и памятников архитектуры.

Литература

1. *Спивак А.А., Спунгин В.Г., Бугаев Е.Г., Горбунова Э.М.* Диагностика тектонических структур территории Ново-Воронежской АЭС на основе анализа микросейсмических колебаний // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 1999. – № 3. – С. 268–276.
2. *Невзоров А.Л., Кубасов В.Н.* Геологическая среда Архангельска и особенности ее взаимодействия с инженерными сооружениями // Геозкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – Архангельск: АГТУ, 2001. – № 2. – С. 116–121.
3. *Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Дыховичная Н.А., Капустян Н.К.* Высотные здания – активный элемент геологической среды города // Сергеевские чтения. Инженерная геология и охрана окружающей среды. Современное состояние и перспективы развития. – М.: ГЕОС, 2004. – Вып. 6. – С. 417–421.
4. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 519 с.
5. *Рыкунов Л.Н.* Микросейсм. Экспериментальные характеристики естественных микровибраций грунта в диапазоне периодов 0.07–8 сек. – М.: Наука, 1967. – 86 с.
6. *Рабинер Л., Гоул Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1979.
7. *Адушкин В.В., Спивак А.А., Локтев Д.Н.* Диагностика массивов горных пород на территории ПО “Маяк” по результатам мониторинга релаксационных процессов // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 1. – С. 18–30.
8. *Вишневский П.В., Кузнецов Г.Е., Боровский М.Я.* Геодинамические и геозкологические аспекты мониторинга геологической среды Республики Татарстан // Геодинамика и геозкология: Матер. межд. конфер. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 1999. – С. 54–56.
9. *Юдахин Ф.Н., Французова В.И.* Европейская часть России, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ГС РАН, 2001. – С. 128–139.
10. *Николаева С.Б.* Палеосейсмические проявления северо-восточной части щита и их геолого-тектоническая позиция // Геоморфология. – 2001. – С. 69–81.
11. *Lagerback R.* Late Quaternary faulting and paleoseismicity in northern Fennoscandia, with particular reference to the Lansjary area, northern Sweden // Geologiska Föreningens i Stockholm Forhandling-ar. – 1990. – Vol. 112. – № 4. – P. 333–354.
12. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации // ОСП-97. – М.: ОИФЗ им. О.Ю.Шмидта, 1998.
13. *Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Проблемы сейсмического районирования территорий России. – М.: ВНИИГПИ, 1999. – 56 с.
14. *Юдахин Ф.Н., Щукин Ю.К., Макаров В.И.* Глубинное строение и современные геодинамические процессы в литосфере Восточно-Европейской платформы. – Екатеринбург, 2003. – 299 с.
15. *Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В.* Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания // ДАН. – 2005. – Т. 402. – № 2. – С. 255–259.
16. *Капустян Н.К.* Техногенное воздействие на литосферу – объект планетарных исследований XXI века // Проблемы геофизики XXI века / Под ред. А.В. Николаева. – Кн. 2. – М.: Наука, 2003. – С. 213–244.
17. *Капустян Н.К., Левиенко В.Т., Юнга С.Л.* Экспериментальные исследования сейсмичности платформ: проблемы и пути решения // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения. – Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2002. – Т. 2. – С. 32–37.
18. *Спивак А.А., Спунгин В.Г., Дубиня В.А.* Контроль механической устойчивости локальных участков земной коры при обеспечении долговременной безопасной эксплуатации подземных захоронений радиоактивных отходов // Препринт. – М.: ИДГ РАН, 1995.
19. *Рыкунов Л.Н., Смирнов В.Б.* Сейсмология микромасштаба // Взаимодействие в системе литосфера-гидросфера-атмосфера. – М.: Недра, 1996. – С. 5–18.
20. *Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В.* Выявление слабоактивных разломов платформ с использованием наносейсмической технологии // ДАН. – 2005.

- Т. 405. – № 4. – С. 1–6.
21. *Кочарян Г.Г., Стивак А.А.* Динамика деформирования блочных массивов горных пород / Под ред. В.В. Адушкина. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. – 423 с.
 22. *Кубасов В.Н., Осипов Н.А.* К вопросу информационного обеспечения инженерно-геологических исследований // Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах: Матер. междунар. науч.-технич. конфер. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – С. 79–83.
 23. *Медведев С.В.* Инженерная сейсмология. – М.: Госстройиздат, 1962.
 24. *Лютюев В.А.* Сейсмогенные зоны республики Коми и особенности микросейсморайонирования г. Сыктывкара. – Сыктывкар: Геопринт, 2001. – 32 с.
 25. *Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Басакин Б.Г.* Опыт обследования зданий и исторических сооружений с использованием сейсмических методик // VI Уральская молодежная научная школа по геофизике. – Пермь: Горный институт УрО РАН, 2005. – С. 9–13.
 26. *Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В.* Исследование динамики инженерных сооружений в геологической среде города (на примере Архангельска) // Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере. – Сыктывкар: Геопринт, 2005. – С. 414–417.
 27. *Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Капустян Н.К.* Сейсмический мониторинг городской среды Архангельска с использованием динамики зданий и сооружений // Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах: Матер. междунар. конфер. – Архангельск: АГТУ, 2003. – С. 197–201.
 28. *Юдахин Ф.Н., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В., Капустян Н.К.* Натурные сейсмические наблюдения взаимодействий атмосфера – инженерные сооружения – верхи земной коры // Строение, живая тектоника и дислокации платформ и их горно-складчатых обрамлений: Матер. междунар. конфер. – М.: МПР РФ-РАН, 2003. – CD. – С. 291–295.
 29. *Капустян Н.К., Дыховичная Н.А.* Сейсмический мониторинг ветровых колебаний высотных зданий // Моніторинг незпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища. – Киев: КНУ, 2003. – С. 30–32.
 30. *Басакин Б.Г.* Применение малоглубинной сейсморазведки при исследовании архитектурных сооружений и при картировании малоамплитудных разломов (на примере Архангельска) // Строение, геодинамика и минерагенические процессы в литосфере: Матер. XI междунар. науч. конфер. – Сыктывкар: Геопринт, 2005. – С. 30–32.