

**ПЕРСПЕКТИВЫ МОНИТОРИНГА ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И
СЕЙСМОСТОЙКОСТИ СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА
ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСЕЙСМ****THE PROSPECTS OF MONITORING OF THE PHYSICAL STATE AND SEISMIC
STABILITY OF SOCIAL OBJECTS ON TO BASIS OF THE RESEARCH OF
MICROSEISMS**

Имараттардын жана курулуштардын физикалык абалына жана сейсмотуруктуулугуна алардын микросейсмикалык термелүүлөрүн изилдөө методу менен мониторинг жүргүзүү маселелери каралган.

Ачык сөздөр: имараттар жана курулмалар, физикалык абалы, сейсмотуруктуулук, микросейсмалар, мониторинг.

Рассматриваются вопросы мониторинга физического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений методом исследования их микросейсмических колебаний.

Ключевые слова: здания и сооружения, физическое состояние, сейсмостойкость, микросейсм, мониторинг.

Questions and monitoring of a physical state and seismic stability of buildings and constructions are considered by method of research of their microseismic fluctuations.

Keywords: buildings and structures, physical condition, seismic resistance, microseisms, monitoring.

Участившиеся в последние годы мощные землетрясения, которые случаются и на территории Центральной Азии, вновь подтверждают актуальность исследования, ведения мониторинга физического состояния и сейсмостойкости различных социальных объектов (жилые дома, школы, детсады и др.) и промышленно-гражданских сооружений.

Сейсмостойкость зданий и сооружений зависит от ряда факторов. Она обеспечивается выбором благоприятной в сейсмическом отношении площадки строительства, в частности, грунтовых условий, разработкой наиболее рациональных конструктивных и планировочных схем строительства. Сейсмостойкость зданий улучшается конструктивными мерами, повышающими прочность и монолитность несущих конструкций, а также создающими возможность развития в конструктивных элементах и узлах пластических деформаций, увеличивающих сопротивляемость сооружений действию сейсмических сил. Сейсмостойкость зданий и сооружений зависит от качества стройматериалов и работ.

Величина сейсмической нагрузки в большинстве случаев зависит от интенсивности, продолжительности и частотных характеристик ожидаемого землетрясения, геологических условий площадки строительства и динамических параметров сооружения.

Существует ряд *методов инструментального обследования зданий и сооружений*, в числе которых можно привести следующие:

- *обследование зданий и сооружений методами неразрушающего контроля;
- *техническое обследование зданий и сооружений ультразвуковым методом (ультра-звуковая дефектоскопия) - определение скрытых дефектов конструкций здания, определение глубин трещин в конструкциях, определение плотности бетона;

- *техническое обследование зданий и сооружений визуально-измерительным методом контроля;
- *обследование тепловизионным методом - определение теплозащитных качеств конструкций стеновых ограждений;
- *нивелирная теодолитная съемка - определение осадки объекта, деформации несущих конструкций зданий;
- *обследование зданий и сооружений методом вибродиагностики;
- *обследование зданий и сооружений методом отрыва со скалыванием - определение прочности материала;
- *техническое обследование зданий и сооружений методом акустической эмиссии;
- *обследование зданий и сооружений магнитометным методом - определение толщины защитного слоя железобетонных конструкций;
- *обследование зданий и сооружений на влажность конструкций;
- *техобследование зданий и сооружений методом капиллярной цветной дефектоскопии;
- *техобследование зданий и сооружений ультразвуковой толщинометрией и др.

Наряду с этими методами, в последние годы широко начали использовать *метод определения физического состояния и сейсмостойкости* зданий и сооружений, основанный на исследовании микросейсмических колебаний – *микросейсм* объектов [1]. Различные виды данного метода начали применять в России, Японии и в странах Евросоюза.

*Микросейсм*ы – это колебания земной поверхности малой амплитуды, вызываемые прохождением циклонов и другими атмосферными процессами, также и деятельностью человека. Начало изучению микросейсм было положено в 1913 г. акад. Б.Б.Голицыным. В последующем большой вклад в изучение низкочастотных микросейсм внесли Л.Н.Рыкунов (1967-78, 1982, 1996), Л.П.Винник (1968), Ф.И.Монахов (1977), В.Н.Табулевич (1986) и О.Б.Хаврошкин (1999, 2000) и др. ученые, которые сформировали представления о механизмах излучения микросейсм, раскрыли основные их особенности.

*Микросейсм*ы, как многокомпонентное явление, состоят из *эндогенного излучения* и *экзогенных шумов техногенного* или *естественного происхождения* (ветровые, прибойные и прочие явления). Эндогенные микросейсм являются индикатором состояния среды. В конце 20-го века было *сделано важное открытие в геофизике* - явление модуляции высокочастотных микросейсм деформационными процессами. Микросейсмические колебания пронизывают земную кору и все, что на ней находится.

К экзогенным источникам микросейсм относятся антропогенные, в частности, *техногенные помехи* и *природные шумы* – от ветра, циклонов, волнения моря и даже грозовой деятельности. *Сейсмические шумы*, т.е. микросейсм порождаются городами, транспортом, всем тем, что связано с деятельностью человека.

В зависимости от природы возникновения сейсмический шум используют для прогноза сильных землетрясений или для исследования состояния зданий и сооружений [2-4]. Микросейсм несут в себе *сведения о характерных частотах колебаний*, т.е. о *динамических свойствах грунта* и *здания*, способных усиливать или уменьшать амплитуды колебаний. Исследуя микросейсм можно оценить свойства грунтов района предполагаемого строительства, а также *оценить физическое состояние и сейсмическую устойчивость* построенных зданий. Это обосновано тем, что микросейсм отражают характерные периоды сотрясений всего комплекса - грунтов, фундамента и самого здания. Зная диапазон периодов наиболее опасных колебаний от землетрясений, и сравнивая его с измеренными (зарегистрированными) собственными микроколебаниями здания или сооружения, можно принять меры по повышению сейсмостойкости здания.

Методы инструментального мониторинга состояния зданий различаются способами получения волновых полей микросейсм и применяемыми схемами обработки, их можно свести в 3 группы: 1. Методы искусственного возбуждения колебаний зданий ударами разной силы по зданию или вне его (Шахраманьян и др., 1999). Основными недостатками являются необходимость создания идентично воздействующего сигнала для накопления отклика и доступность для отдельной части здания.

2. Методы регистрации действующих микросейсм на коротких профилях здания с последующей корреляционной обработкой. Разрабатываются в ГС СО РАН (Селезнев и др., 1999), ориентированы на здания и косвенно затрагивают свойства грунтов основания.

3. Методы использования собственных колебаний зданий, возбуждаемых атмосферным давлением. Регистрируются одновременно пульсации давления и ветровые колебания здания. Наблюдения ведутся в одной точке, в т.ч. вне здания, позволяют судить о состоянии здания в целом и изменениях в грунтах основания; детальное обследование здания проводится в нескольких ключевых точках (Юдахин Ф.Н. и др., 2004, Острецов и др., 2004).

Методы использующие ветровые колебания входят в 3-ю группу и включают несколько технологий проведения натуральных наблюдений, ориентированных на обследование зданий. Отличием их являются точечные измерения, производимые в течение нескольких часов с последовательным перемещением по объекту.

Институтом экологических проблем Севера Уральского Отделения РАН (г. Архангельск) совместно с *Институтом физики Земли РАН* (г. Москва) разработаны методы анализа, основанные на двух составляющих микросейсм – техногенной и эндогенной (Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Шахова Е.В.). Они используются при обработке результатов записи и исследований микросейсм.

Несмотря на отдельные дискуссии среди ученых [5] о необоснованности применения, метод микросейсм стал известен как метод динамических испытаний для оценки технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях. Он вошел в «Методику оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений» [7] МЧС РФ (2003г.) и в Межгосударственный стандарт СНГ, в ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» от 4.12.2012г. В Приложении М (обязательное) данного ГОСТа при заполнении Формы паспорта здания (сооружения) рекомендована определить динамические параметры.

Динамические параметры зданий и сооружений - это параметры зданий и сооружений, характеризующие их динамические свойства, проявляющиеся при динамических нагрузках, включающие в себя *периоды и декременты собственных колебаний* основного тона и обертонов, передаточные функции объектов, их частей и элементов и др. Текущие динамические параметры определяются на момент обследования или проводимого этапа мониторинга здания и сооружения.

Из вышеизложенных следует, что методы исследования физического состояния мониторинг сейсмостойкости зданий и сооружений с помощью параметров микросейсмических колебаний (микросейсм) имеют хорошие перспективы применения. Так как определение динамических параметров объектов предусмотрено как обязательная процедура при оформлении паспорта здания или сооружения при обследовании и мониторинге их технического состояния согласно действующему ГОСТу ГОСТ 31937-2011.

Упомянутая методика [6, 7] предназначена для оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений на основе комплексного анализа их геометрических, физико-механических и *динамических параметров*, полученных с применением диагностического комплекса «Струна» (рис.1), созданного Центром исследований экстремальных ситуаций (Москва) [8]. Он предназначен для анализа повреждений, дефектов и сейсмоустой-



Рис.1. Комплекс «Струна»

чивости зданий и сооружений, включает 5 приборов "Струна" с размером телефона и базового модуля (преобразователя и портативного компьютера). Приборы имеют три сейсмодатчика – пьезоэлементов, фиксирующих колебания в трех направлениях, и вмонтированный радиопередатчик, отправляющий сигналы на базовую станцию, которая может находиться на расстоянии до 1 км. Пьезодатчики позволяют

в широком диапазоне частот (от 0,1 до 150 Гц) фиксировать колебания зданий любого качест-

ва и с любым повреждением и износом (от новостроек до промышленных дымовых труб). Отправленные сигналы на базе оцифровываются с помощью преобразователя и передаются на портативный компьютер, где с помощью специальной программы обрабатываются для анализа и определения устойчивости, сейсмостойкости и физического износа здания или сооружения. Чувствительность приборов очень высока. Например, комплекс «Струна» позволяет обнаружить даже прислонившегося к стене человека по биению его сердца. Но, такая высокая чувствительность, с другой стороны, требует фильтрацию шумового фона от вибраций, возникающих из-за ходьбы людей, проезжающих машин и т.д. Для фильтрации шумов применяется искусственный источник вибрации в виде мешка с песком, которым ударяют по зданию и датчики легко измеряют искусственную вибрацию, выделяют частоту собственных колебаний здания. Отклонение от определенной частоты здания в сторону преимущественно низких частот свидетельствует о большей степени износа, наличия дефектов и (или) разрушений. С помощью компьютера можно создать визуализацию колебаний здания. Если здание колеблется как единое целое, то это говорит о его устойчивости, в том числе и сейсмической. Если части колеблются по-разному, то это свидетельствует о разрыве сплошности, т.е. у здания есть дефекты [8]. В результате можно получить информацию о реальном состоянии исследуемого здания. Частота и амплитуда собственных колебаний с помощью стандартных расчетов указывают на прочность и жесткость конструкции в целом. Даже новое здание определенной конструкции, построенное точно по проекту, колеблется с определенной частотой. А если имеется отклонение от этой величины, в большинстве случаев в сторону низких частот, то это указывает на износ, наличие дефектов или даже разрушений в здании.

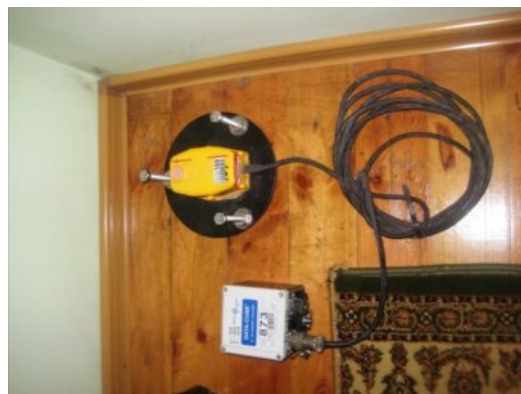


Рис. 2. Измерение микросейсм частного жилого дома прибором типа DATA-CUBE³

Аналогичные исследования начаты нами в НИИ «Сейсмостойкое строительство» КГУСТА в сотрудничестве с ЦАИИЗ. Разработана методика регистрации микросейсм зданий [1], проводилось визуальное обследование характерных жилых зданий г. Бишкек и на отдельных выбранных зданиях апробирован метод регистрации микросейсм, получены первые практические результаты. В наших исследованиях использован трехканальный

сейсморегистратор типа DATA-CUBE³ (Германия, рис.2). Прибор имеет усилитель, может быть использовано несколько сейсмодатчиков, которые подключаются к регистратору с помощью кабеля. Например, в жилом массиве «Ала-Тоо» г. Бишкек исследовались микросейсмы индивидуального дома. Измерения проводились в 7 характерных точках - на грунте вблизи дома и на втором этаже (рис.2). Отметим, что во многих зарубежных странах для исследования динамических параметров зданий используются такие же датчики «Геофон» (на круглой основе, рис. 2) с устройством оцифровки DATA-CUBE³.

Как отмечалось выше, среди выбранных объектов было исследовано 14-ти этажное жилое здание с условным названием «МИР», расположенное в г. Бишкек на проспекте Мира, 93/1 (Рис. 3). Несущая конструкция здания - типичная монолитная железобетонная каркасная структура с колоннами 4x4, соединенными балками и плитами на каждом этаже. Горизон-тальную жесткость всего здания обеспечивают узкие стены сдвига, называемые диафрагмами жесткости или пилонами, подключенные к середине внешних колонок. Сечения колонн и стен сдвига нижней части (подвал, 1-3 этажи) и верхней части (4-13 этажи) здания различны. Стены вокруг лестницы, а также некоторые внутренние стены между колоннами выполнены из кирпича. К кладке стен между внешними колоннами закрепляются бухты на каждой стороне с обрывами. Несущая конструкция двоякосимметрична, за исключением внутренних стен, лестниц и лифтовых стен. Здание с высотой 47 м над уровнем земли, имеет подвал, цокольный этаж и 13 чистовых этажей. Габариты здания в сечении, включая бухты, составляют 24,18 м x 24,18 м.

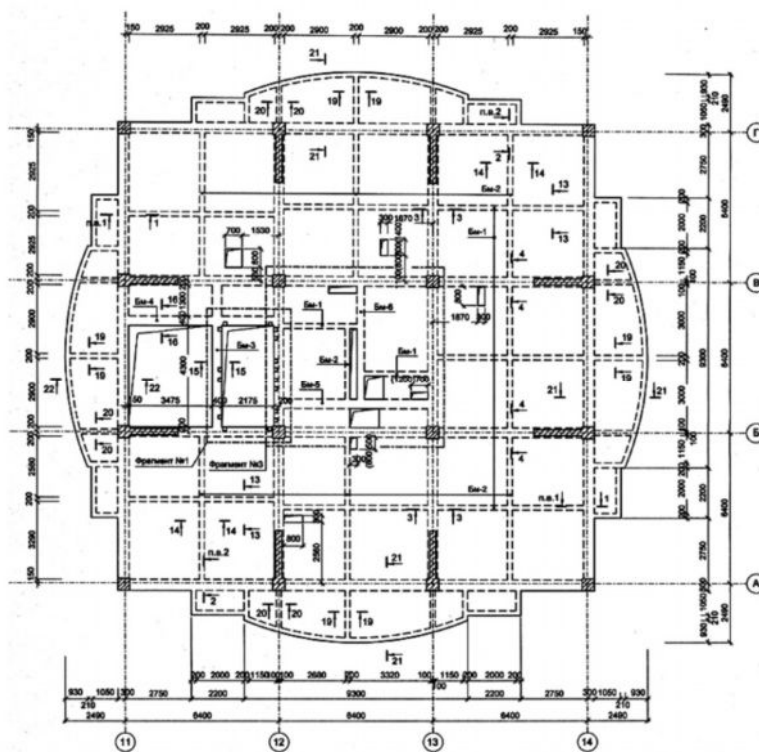


Рис. 3. Общий вид и план сечения исследуемого 14-этажного здания «МИР»

Была проведена запись микросейсмических колебаний здания с использованием сейсмостанций, оснащенных 24-битным устройством оцифровки CUBE, подключенных к трехкомпонентному геофону 4,5 Гц (рис. 2). Частота дискретизации была установлена в 400 Гц, а система отсчета времени была предоставлена встроенным GPS. Так как антенна GPS не всегда принимает сигнал внутри здания, процедура синхронизации времени проводилась до и после измерений, чтобы позже исправить возможные задержки с помощью программного обеспечения. Было установлено по 3 датчика на каждом этаже и

1 – снаружи здания, максимальное количество точек измерений составляло 40. Запись микросейсмического шума производилась с 15.00 до 24.00 часов.

На рис.4 показаны спектры частот собственных колебаний данного здания после обработки данных. Обработка включает преобразование записанных сейсмодатчиками сигналов в стандартный в сейсмологии формат MiniSEED с коррекцией и фильтрацией данных ниже 0,5 Гц. Приведены спектры для здания «МИР» с учетом двух горизонтальных и вертикального компонентов движения (продольные и поперечные составляющие вдоль главной оси здания). Они получены датчиками, установленными вдоль вертикальной линии, в интервале трех частотных диапазонов (1-2 Гц; 3-5 Гц; 6-9 Гц), включающих основные резонансные пики (основные частоты и обертоны).

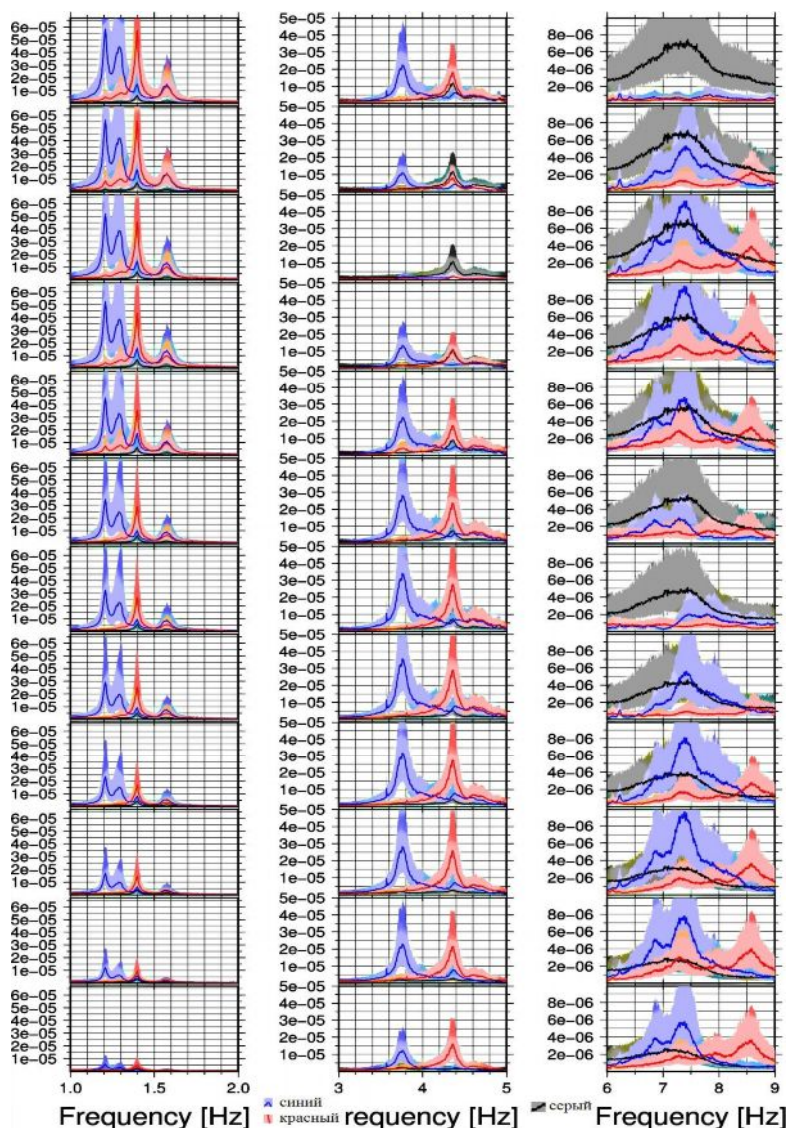
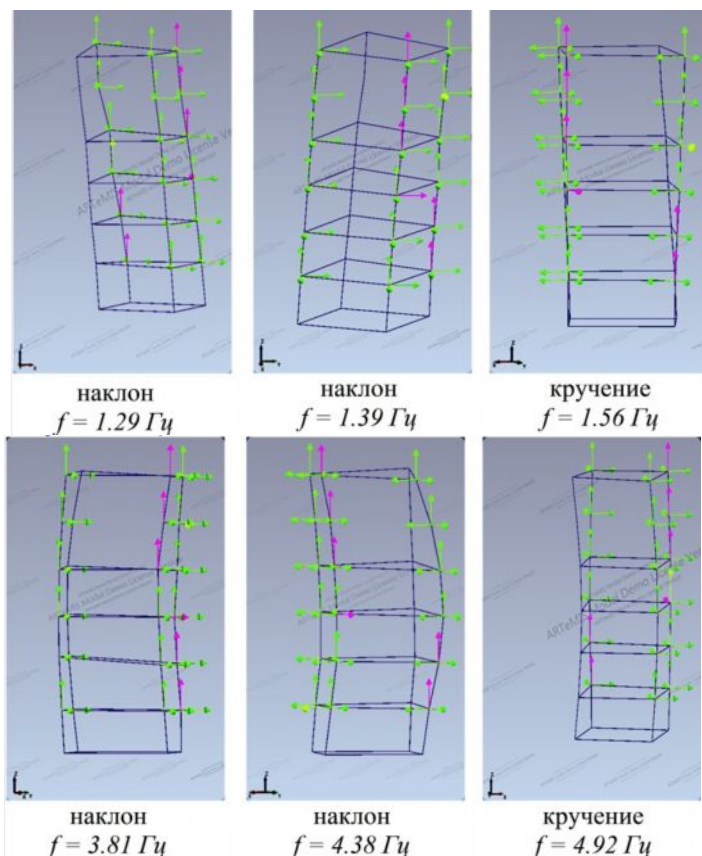


Рис.4. Средний (\pm) один стандартный спектр, вычисленный для датчиков, установленных в здании «МИР»: нижняя линия соответствует подвалу, верхняя строка – 11-му этажу; синий, красный и серый цвет соответствуют продольному, поперечному и вертикальному компонентам; столбцы – спектры в трех частотных диапазонах.

Таблица 1 - Частотные значения, определенные для здания «МИР» с техникой ЧД

Частота, Гц	Комментарий
1,289	Наклон
1,387	Наклон
1,563	Кручение
3,809	Наклон
4,375	Наклон
4,922	Кручение
7,07	Напряжение
7,539	Наклон + Кручение
8,301	Наклон + Кручение

Рис. 5 . Описание первых шести типов колебаний здания «МИР» на упрощенной схеме структуры



Продолжение рис. 5. Описание первых шести типов колебаний здания «МИР» на упрощенной схеме структуры

Для интерпретации спектральных особенностей колебаний был выполнен Оперативный Модальный Анализ с применением методологии Частотной Декомпозиции (ЧД) (Бринкнер и др., 2001), с помощью программного обеспечения ARTeMIS Modal 3.0.

В табл. 1 приведены основные резонансные частоты, выявленные с сингулярным разложением, а модальная форма 6 первых режимов (первый и второй изгиб, режимы кручения) показаны на рис. 5. Из этих данных видно, что исследуемое здание под воздействием нагрузок может подвергаться сложным деформациям, а величина частот собственных колебаний находится в пределах от 1,289 до 8,301 Гц. *Отклонения собственных частот в сторону низких частот нет, следовательно, здание не имеет дефектов и разрушений, оно сейсмостойчиво.*

Таким образом, период собственных колебаний здания учитывает практически все основные физико-механические показатели и геометрию, от которых зависит сейсмостойкость здания. Метод исследования динамических параметров микросейсмических колебаний зданий или сооружений позволяет вести мониторинг их физического состояния и сейсмостойчивости неразрушающим способом, имеет большие перспективы применения в строительной науке и практике.

Список литературы

1. Мендекеев Р.А. Определение состояния зданий и сооружений с помощью исследования микросейсм объекта [Текст] / Р.А. Мендекеев, С.Ж.Орунбаев, Б.М.Атабаев, У.С.Кыдыралиева // Вестник КГУСТА. – 2016. - №1(51). – С.263-269.
2. Юдахин Ф.Н. Применение микро-сейсмических технологий для исследования геологической среды и конструктивной целостности зданий // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы [Текст]: Кн. 2: Микросейсмичность // Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, Е.В. Шахова // Под ред. Н.В. Шарова и др. - Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 34-47.

3. Селезнев В.С. Способ определения физического состояния зданий и сооружений [Текст] / Селезнев В.С., Еманов А.Ф. и др. // Патент RU. 2140625 С1, 17.02.98, бюлл. № 30. - 27.10.1999.

4. Еманов А.Ф. Технология диагностики и мониторинга состояния строительных конструкций на основе исследования микросейсмических колебаний [Электронный ресурс] / А.Ф. Еманов, Л.А.Скляров // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Эл. журнал. - Новосиб., 2009. – 8 с. Режим доступа: <http://www.pamag.ru/prensa/tech-diagnoz>.

5. Кабанцев О.В. Оценка сейсмостойкости существующих зданий [Электронный ресурс] / О.В. Кабанцев, Г.П. Тонких / Режим доступа: http://scadsoft.com/download/2013Kiev/Seismostoikost_zdaniy.pdf. - Дата обр. 30.04.2016

6. Сушев С.П. О практическом применении метода динамических испытаний для оценки категории технического состояния и сейсмостойкости зданий и сооружений при слабых и сильных импульсных воздействиях [Текст] / С.П.Сушев, В.А.Ларионов и др. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2014. - № 3. - С.52.

7. МЧС РФ. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. Разраб. Федеральным центром науки и высоких технологий «Всеросс. НИИ по проблемам ГОиЧС» и принята Госстроем России [Электронный ресурс] / Разработчики: д.т.н., проф. Шахра-маньян М.А., к.т.н., доц. Нигметов Г.М. и др. – Москва, 2003 Режим доступа: <http://meganorm.ru/Data2/1/4293831/4293831920.htm>.

8. Диагностический комплекс «Струна» для анализа повреждений, дефектов и сейсмоустойчивости зданий и сооружений [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://earthtremor.ru/building/900-diagnosticheskiy-kompleks.html>.