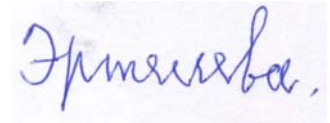


На правах рукописи



**Эртелева Ольга Олеговна**

**ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
В ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

Специальность 25.00.10 Геофизика, геофизические  
методы поисков полезных ископаемых

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук в лаборатории методов прогноза землетрясений.

**Официальные  
оппоненты:**

**Родкин Михаил Владимирович,**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, заведующий лабораторией регистрации и интерпретации волновых полей;

**Заалишвили Владислав Борисович,**  
доктор физико-математических наук, профессор, Геофизический институт – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук», директор, зав. отделом геофизики, инженерной сейсмологии и геоинформатики;

**Бугаев Евгений Геннадьевич,**

доктор технических наук, Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», главный научный сотрудник Отдела устойчивости к внешним воздействиям.

**Ведущая  
организация:**

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт динамики геосфер Российской академии наук.**

Защита диссертации состоится **14 мая 2020 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института [www.ifz.ru](http://www.ifz.ru). Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации [www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru) и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » марта 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук

В.А. Камзолкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Землетрясение – грозное и опасное явление. Гибель людей, повреждения зданий и сооружений вплоть до полного их разрушения – наиболее тяжелые последствия этого стихийного бедствия и порождаемых им вторичных явлений – цунами, обвалов, оползней, разжижения грунтов и др. Проблема снижения социально-экономического ущерба от землетрясений крайне важна и для Российской Федерации, часть регионов которой также подвержена воздействиям сейсмических событий [Природные..., 2000].

Точный прогноз времени и места – наиболее простой путь к решению поставленной проблемы. Однако, несмотря на очевидные успехи в этой области современной науки, следует признать, что точность такого прогноза оставляет желать лучшего. Кроме того, даже точный прогноз не всегда обеспечивает защиту сооружений от воздействия землетрясений.

Поэтому в настоящее время более эффективным и перспективным решением этой проблемы может являться застройка районов с низким уровнем сейсмической опасности, а также использование в теории и практике сейсмостойкого строительства достижений инженерной сейсмологии.

Очевидно, что для реализации таких подходов первоочередной задачей является оценка сейсмической опасности и ее неотъемлемая составная часть - прогноз количественных характеристик сейсмического движения грунта. Использование этих параметров при инженерных расчетах позволяет разрабатывать сейсмостойкие конструкции, соответствующие местным условиям. Экономическую эффективность решения задачи уменьшения ущерба от землетрясений трудно переоценить.

Исследования особенностей сильных движений грунта в зоне, где сейсмические волны еще только формируются, важны также для изучения очаговых процессов. Таким образом, исследование количественных характеристик сейсмических колебаний в эпицентральных областях землетрясений имеет огромное теоретическое и практическое значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Прогноз параметров сейсмических колебаний невозможен без проведения работ по оценке сейсмической опасности. Комплекс сеймотектонических исследований и сейсмологических наблюдений, а также определение параметров сейсмического режима изучаемого района позволяет создать сеймотектоническую модель региона, построить карту зон ВОЗ. Изучение грунтовых условий проводится при работах по сейсмическому микрорайонированию.

К сожалению, оценка сейсмической опасности пока зачастую характеризуется лишь сейсмической интенсивностью и ее приращениями, которая используется в качестве входных данных при расчетах по спектральному методу. Такой прогноз осуществляется с использованием макросейсмических данных, а также данных о параметрах колебаний, зарегистрированных в изучаемом районе.

При динамических методах расчетов, которые в последнее время приобретают все большее распространение, необходимы также оценки инженерных характеристик сейсмических колебаний – ускорений, скоростей, смещений, их спектры и др. Прогноз их ведется как с использованием различных теоретических закономерностей, так и по результатам статистической обработки инструментальных записей. В последнем случае основополагающую роль в методиках прогноза имеет установление корреляционных связей между параметрами колебаний и параметрами очага и среды,

и, конечно, определение точности таких соотношений.

Тем не менее, следует отметить, что в настоящее время уровень взаимодействия инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства явно недостаточен. Хотя в практике инженерных расчетов обычно используются ускорения, расчеты многих современных объектов требуют учета не только ускорений грунта, но и скоростей, и смещений. При проектировании объектов повышенной ответственности принимаются во внимание спектральный состав и продолжительность колебаний. В связи с этим актуальной для инженерной сейсмологии становится задача более тщательного исследования указанных характеристик сейсмического движения грунта и разработки прогнозных соотношений для практического использования в сейсмостойком строительстве.

Наибольшее внимания при этом требует к себе ближняя зона землетрясений, так как именно в ней наблюдаются причиняющие максимальный ущерб колебания. Накопленные эмпирические данные демонстрируют существенное отличие таких движений от колебаний в дальней зоне. Существующие теоретические представления о генерации и динамике сейсмических волн плохо отражают сложную природу землетрясений, что выражается в расхождениях различных прогнозных модельных расчетов с практикой. Закономерности формирования и распространения волнового фронта, установленные при анализе эмпирических данных, будут являться основой для построения адекватных физических и математических моделей сейсмических процессов.

**Цель и основные задачи работы.** Объектом исследования являются количественные характеристики сейсмических колебаний. Исследования направлены на решение следующих задач:

- установление закономерностей формирования и распространения сейсмических колебаний при землетрясениях;
- изучение взаимозависимостей различных характеристик колебаний;
- разработку корреляционных соотношений параметров сейсмических колебаний с параметрами очага и среды для прогнозирования сейсмических воздействий.

Новым направлением в этой области является разработка методики прогноза параметров сильных движений грунта, основанная на статистическом анализе эмпирического материала. Особое внимание уделено исследованию скоростей сильных движений грунта при землетрясениях, разработке прогнозных соотношений в скоростях как во временной, так и в спектральной области.

**Научная новизна.** Предложены новые модели затухания ускорений в различных зонах. В каждой зоне установлены эмпирические формулы, описывающие уровень амплитуды ускорения грунта в зависимости от магнитуды землетрясения, типа подвижки в очаге, грунтовых условий и кратчайшего расстояния от поверхности разрыва.

Исследованы зависимости параметров спектра реакции в ускорениях от различных факторов (магнитуды, типа механизма очага, расстояния, грунтовых условий, уровня и продолжительности колебаний).

Предложен метод построения локального спектра реакции в ускорениях.

Впервые установлен закон масштабирования скоростей колебаний.

Установлен закон затухания пиковых скоростей. Выделены три зоны, в которых затухание существенно различается. Последний факт по скоростям колебаний отмечен впервые.

Описаны зависимости соотношения уровней амплитуд скоростей на вертикальной и горизонтальной компоненте от различных факторов.

Впервые установлена средняя форма спектра реакции в скоростях для отдельного землетрясения.

Исследованы соотношения различных параметров спектра реакции в скоростях, и установлены зависимости различных параметров спектра от параметров очага и среды. Разработаны соответствующие корреляционные соотношения, включая оценки стандартных отклонений.

Впервые предложена методика задания сейсмических воздействий в скоростях, которая может быть использована при оценке сейсмической опасности и расчетах зданий и сооружений на сейсмостойкость.

#### **Теоретическое и практическое значение полученных результатов.**

Представляемая работа проводилась в рамках направления “Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий”, включенного правительством РФ и Российской Академией наук в “Программу фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013 - 2020 годы”, что подтверждает теоретическое значение результатов исследований. Установленные закономерности формирования и распространения сейсмических волн могут быть использованы при исследованиях в области физики очага землетрясения, а также для развития методов прогноза землетрясений.

Практическое значение результатов исследований подтверждается тем, что методика и результаты использовались автором при оценке сейсмических воздействий ряда объектов атомной энергетики, например, АЭС “Бушер” (Иран), Ростовской АЭС и др.; трубопроводной системы Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО); объектов строительства и реконструкции топливно-энергетического комплекса, например, трассы магистрального газопровода “Сахалин-Хабаровск-Владивосток”, платформы Аркутун-Даги (о. Сахалин) и др.; при проектировании ряда мостов на территории РФ, в том числе транспортного перехода через Керченский пролив и объектов его инфраструктуры; ряда гидротехнических сооружений, например, Рогунской ГЭС (Таджикистан), Ирганайской ГЭС и др.; на площадке строительства конференц-центра для проведения саммита АТЭС-2012 (о. Русский); для некоторых уникальных объектов, например, Лахта-центра в г. Санкт-Петербурге; при оценке сейсмических воздействий для объектов гражданского строительства в г. Калининграде, г. Москве, г. Сочи, г. Симферополе и других.

Некоторые результаты автора нашли свое отражение в нормативных документах, таких как СП 286.1325800.2016, ГОСТ Р 57546-2017, СП 408.1325800.2018, ГОСТ 34511-2018.

**Методология и методы исследования.** В работе использовалась база параметров сильных движений грунта различных регионов мира, созданная при непосредственном участии автора. Для создания базы параметров использовались как данные из литературных источников, бюллетеней, каталогов, так и цифровые записи сильных движений грунта. Последние были обработаны автором для получения изучаемых характеристик сейсмических колебаний. При проведении дальнейших исследований применялись методы статистической обработки эмпирических данных.

#### **Защищаемые положения:**

1. единый для всех магнитуд закон затухания пиковых амплитуд ускорений грунта в эпицентральной области землетрясения с учетом зависимости декремента

поглощения от уровня колебаний, в соответствии с которым волновое поле (по ускорениям) делится на 3 зоны с различными законами затухания волн. Зависимости характеристик ускорений сейсмических колебаний от параметров очага и среды, описывающие связь амплитуд, продолжительности колебаний, преобладающего периода и коэффициента динамического усиления с магнитудой, расстоянием, механизмом очага и грунтовыми условиями, установлены для ближней и дальней зон отдельно. Выявленные закономерности способствуют увеличению точности прогнозных оценок пиковых ускорений и их характеристик как во временной, так и в спектральной области;

2. закон масштабирования пиковых скоростей, устанавливающий независимость на подобных расстояниях пиковых скоростей от магнитуд и позволяющий при исследовании волнового поля рассматривать все эмпирические данные совместно;

3. модель формирования и распространения сейсмических колебаний в скоростях, включающая закон затухания пиковых скоростей, закономерности формирования формы спектра реакции в скоростях и его среднюю форму, а также зависимости характеристик скоростей сейсмических колебаний от параметров очага и среды. Как и в случае пиковых ускорений, согласно закону затухания скоростей в эпицентральной области землетрясений существуют 3 зоны с различными характеристиками сейсмических колебаний. Установленные закономерности являются основой для разработки системы прогнозных оценок в скоростях;

4. методика прогноза параметров сильного движения грунта при землетрясениях, основанная на разработанных эмпирических корреляционных соотношениях, связывающих характеристики сейсмических колебаний с различными параметрами очага и среды, позволяющая производить оценку сейсмических воздействий с различным доверительным уровнем и являющаяся практической реализацией результатов проведенных исследований.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается применением в ходе исследований представительного объема эмпирического материала и современных методов анализа и обработки эмпирических данных, принятых в мировом научном сообществе, а также современным оборудованием и программным математическим обеспечением. Достоверность полученных результатов подтверждается также сравнением результатов расчетов с эмпирическими данными на всех этапах исследования.

Отдельные разделы работы докладывались на 16 международных конференциях, включая 1-ую Европейскую конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмологии (Женева, Швейцария, 2006), XXIV Генеральную Ассамблею Международного союза по геодезии и геофизике (Перуджа, Италия, 2007), XIV Всемирную конференцию по инженерной сейсмологии (Пекин, КНР, 2008), XIV Европейскую конференцию по инженерной сейсмологии (Скопье-Охрид, 2010), 8-ую (Ханой, Вьетнам, 2010) и 9-ую (Улан-Батор, Монголия, 2012) Генеральные Ассамблеи Азиатской сейсмологической комиссии; на 13 российских конференциях, в том числе на XIX и XXI научно-практических конференциях с международным участием “Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы” (Москва, 2014; 2018), Евразийских форумах SEISMO-2016 (Москва, 2016) и SEISMO-2017 (Москва, 2017, на VI, XI и XIII Российских национальных конференциях по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) (Сочи,

2005; 2015; Санкт-Петербург, 2019); а также на заседаниях МСССС при ЦНИИП Минстроя России (2017), съезде строителей (2016, 2017) и заседаниях Ученого Совета ИФЗ (2008 – 2019).

**Публикации и личный вклад автора.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 80 печатных работах (из них 29 статей - в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов докторских и кандидатских диссертаций), а также в 4 нормативных документах (в соавторстве).

Цели и задачи работы сформулированы автором, им же проведена обработка и анализ использованных данных. Личный вклад автора выразился в разработке алгоритма для оценки количественных параметров колебаний грунта при землетрясениях. Указанный алгоритм был реализован в виде набора программ для расчетов количественных характеристик, используемых при анализе сильных движений грунта. Все вычисления, представленные в диссертационной работе, лично получены автором. Диссертантом предложено объяснение полученных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем работы составляет 290 страниц, в том числе 77 рисунков, 21 таблица; список литературы содержит 512 наименований.

**Благодарности.** Автору оказывали помощь и поддержку в работе С.С.Арефьев, Р.Э.Татевосян, Ж.Я.Аптекман, К.Г.Плетнев, Е.А.Рогожин, А.Я.Сидорин, А.И.Рузайкин, А.Л.Стром, А.Г.Бугаевский, А.А.Никонов, Ф.Ф.Аптикаев, Н.К.Капустян, М.Д.Трифунас, М.Тодоровска, Х.Санди и др. Значительное количество неопубликованных цифровых записей сильных движений было предоставлено автору М.Тодоровской (записи, полученные в США сетью станций Университета Южной Калифорнии (USCLA)), В.А.Павленовым (записи землетрясений Прибайкалья), Дж.Гарагозовым (записи землетрясений Туркменистана), А.Махдавианом (записи Ирана), Саурабом Баруа, Анандом Джоши и С.С.Теотиа (записи Индии), И.С.Борча (записи землетрясений Румынии, зоны Вранча).

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** к диссертации дано обоснование актуальности темы, указаны цель и задачи исследования, основные защищаемые положения, а также охарактеризована научная новизна, практическая значимость и апробация результатов исследований.

**В первой главе**, носящей вводный характер, приведен анализ литературных данных по теме исследований. Рассмотрено понятие ближней зоны землетрясения, наиболее опасной для людей и сооружений при сейсмических событиях. Согласно современным взглядам эта зона обладает рядом особенностей, которые противоречат классическим теоретическим представлениям о процессах генерации и распространения сейсмических волн. Например, при выходе разлома на дневную поверхность в непосредственной близости от него остаточные деформации особенно велики, но максимальные амплитуды ускорения наблюдаются на некотором расстоянии от разлома. На поверхности разрыва амплитуда ускорения в среднем постоянна и не зависит от магнитуды землетрясения. Максимальные амплитуды ускорений при 9 - 11 баллах одинаковы, т.е. при интенсивности выше 9 баллов ускорения перестают быть мерой сейсмического воздействия. Многими исследователями отмечаются существенные различия параметров сейсмического

движения грунта в ближней и дальней зонах. Однако четкого определения понятия ближней зоны нет. Физически обоснованная оценка размеров этой зоны, зависящих от магнитуды, приводится в работах Ф.Ф.Аптикаева [Аптикаев, 2012 и др.], что представляется вполне разумным, поскольку и сила, и макросейсмический эффект любого сейсмического события, так же, как и размеры области, подверженной сейсмическим воздействиям, зависят от магнитуды.

При исследованиях динамики сейсмических волн и оценках порождаемых ими сейсмических воздействий наибольший интерес вызывают законы затухания пиковых амплитуд ускорений, поскольку этот параметр является наиболее востребованным практикой. Большим достижением явился переход от использования эпицентрального и гипоцентрального расстояний к кратчайшему расстоянию до поверхности разлома. Было обнаружено, что описание затухания одной формулой для различных расстояний сопровождается значительными ошибками. Наиболее часто в уравнениях затухания используют магнитуду по поверхностным волнам  $M_S$ , а в последние годы – моментную магнитуду  $M_W$ .

Многочисленные работы посвящены влиянию грунтовой толщи на уровень ускорений [Field, 2000; Павленко, 2009; Калинина и др., 2017 и др.]. В работах последних лет наметился переход от характеристики грунтов по категориям к непрерывной, основанной на использовании акустической жесткости грунтов [Idriss, 2009; Алешин, 2017 и др.]. Эмпирические данные при высоких интенсивностях показывают, что амплитуды выше на скальных грунтах.

Одним из важных вопросов, касающихся уровня амплитуд колебаний, является соотношение амплитуд на различных компонентах. Установлено, что использование любой комбинации компонент не влияет на точность уравнений затухания, а величины максимальных амплитуд на двух горизонтальных компонентах в среднем различаются на 24% [Campbell, 1981; 1997; Joyner, Fumal, 1984]. Соотношение амплитуд на вертикальной и горизонтальной компонентах в инженерном диапазоне определяется в основном уровнем максимальной амплитуды колебаний [Mikhailova, Artikaev, 1996].

Период колебаний - параметр, характеризующий частотный состав колебаний грунта. Основными факторами, определяющими его, являются энергия источника, расстояние до поверхности разлома и грунтовые условия, см., например, [Михайлова, 1996; Rathje et al., 2004].

Частотный состав колебаний наилучшим способом можно описать спектром. Наиболее часто в инженерных расчетах используется спектр реакции. Нормированный спектр реакции, как величина безразмерная, не зависит от магнитуды землетрясения [Chopra, 2007; Graizer, Kalkan, 2011 и др.]. Для описания формы спектры часто используется характеристика спада спектра  $S$ -волны на высоких частотах  $\kappa$ . Наряду с уравнениями затухания пиковых ускорений в некоторых работах, например, [Ambraseys, Douglas, 2003; Campbell, Bozorgnia, 2003 и др.] разработаны уравнения затухания спектральных амплитуд.

Для повышения точности задания сейсмических воздействий большое значение имеет продолжительность колебаний. Установлено, что продолжительность возрастает с ростом магнитуды и расстояния, а при фиксированной интенсивности убывает с ростом амплитуды. Это легко объяснимо: чем быстрее выделяется энергия (снимается накопленное напряжения), тем выше будет амплитуда такого движения, а чем более вялый процесс идет, тем больше времени он потребует.



Наглядной характеристикой спектра реакции является коэффициент динамического усиления  $\beta$ , широко используемый в различных инженерных расчетах. Довольно часто этот параметр упоминается в связи с изучением влияния грунтов на амплитуды сейсмических колебаний. Однако, несмотря на его важность, взаимосвязи его с различными факторами, влияющими на формирование спектра колебаний, исследовались в немногочисленных работах [Mikhailova, Aptikaev, 1996; Ashford et al., 2000; Suetomi et al., 2004; Vacareanu et al., 2014b и др.]. Среди характерных особенностей этого параметра следует отметить высокую стабильность его среднего численного значения:  $\beta$  практически не зависит от очаговых параметров и грунтовых условий. По данным различных независимых исследований, среднее значение его при 5%-ном уровне демпфирования (без учета каких-либо факторов) колеблется от 3.5 до 3.7. При фиксированном уровне демпфирования изменения коэффициента динамичности связаны с изменением пикового ускорения: если при слабых колебаниях значение  $\beta$  остается в среднем постоянным, то при больших значениях пикового ускорения не только наблюдается спад  $\beta$ , но и сглаживаются, “размываются” резонансы в грунтах, вплоть до их полного исчезновения [Lee et al., 2015]. Отмеченное явление может быть объяснено нарастанием нелинейных эффектов в среде. Зависит  $\beta$  и от периода колебаний [Pitilakis et al., 2004; Григорян, Карапетян, 2011]: с увеличением периода коэффициент динамичности на коротких периодах возрастает, а при дальнейшем росте в области длинных периодов убывает.

Не менее важным параметром сильных движений грунта является скорость колебаний, интерес к которой в последнее время резко повысился. Эмпирически было доказано, что скорости, по сравнению с ускорениями, имеют более высокую степень корреляции с повреждениями зданий и сооружений, а также с возникающими в результате сейсмического воздействия деформациями. Этот параметр лучше описывает повреждения подземных трубопроводов и используется при исследовании различных нелинейных явлений, в том числе такого явления, как разжижение грунтов. Изучение параметров сейсмического движения грунта с помощью взрывов также проводится по скоростям. Традиционно скорости колебаний одновременно с ускорениями и смещениями используются для построения спектров реакции.

Установлено, что точность оценок пиковых скоростей повышается при использовании кратчайшего расстояния до разлома, а также учета типа грунта и механизма очага. Средняя геометрическая горизонтальная компонента скорости на 17% по амплитудам меньше максимальной. На близких расстояниях от очага при сильных землетрясениях отмечается, что вертикальная компонента равна или превышает горизонтальную. В ряде работ [Campbell, Bozorgnia, 2010; Foulser-Piggott, Goda, 2015 и др.] выводятся уравнения затухания для кумулятивной скорости.

Наибольший интерес при исследовании спектров скоростей вызывают проблемы оценки спектральных амплитуд. Группа сильных движений Университета Южной Калифорнии предположила, что влияние механизма очага является определяющим фактором для спектральных амплитуд скоростей только вблизи разлома. По их мнению, при распространении волнового фронта большое влияние на результирующие колебания имеют явления затухания, рассеивания, интерференции и т.п. [Lee et al., 1995; Lee, Trifunac, 1995; Lee, 2002; 2007].

Работ по оценке различных параметров спектров скоростей или взаимосвязи между этими параметрами крайне мало. Установлено, что преобладающий период скорости вне зависимости от рассматриваемых данных, районов и методов обработки растет с увеличением магнитуды и особенно расстояния. Разницу же в числовых

коэффициентах, свободных членах и стандартных отклонениях прогнозных уравнений относят за счет неучтенных факторов, прежде всего таких, как механизмы очага и грунтовые условия. При анализе средней формы спектров ускорений было установлено [Аптикаев, Эртелева, 2008а], что в среднем преобладающий период колебаний на велосиграмме в 2.7 раза превышает преобладающий период на акселерограмме.

**Выводы по первой главе:**

1. оценка ожидаемых сейсмических воздействий – одна из основных составляющих различных мероприятий по защите от землетрясений. Наибольший ущерб наносится в ближней зоне землетрясения. Однако до сих пор четкое определение этой величины отсутствует. Одна из последних тенденций - определение размеров ближней зоны в зависимости от магнитуды землетрясения.

Ближняя зона обладает рядом характерных особенностей относительно распространения сейсмического волнового фронта. Многие принятые теоретические представления опровергаются накопленными эмпирическими данными;

2. наиболее популярным и хорошо исследованным параметром сейсмических колебаний является ускорение. Разработаны разнообразные уравнения затухания, установлены зависимости параметров записи и спектра от характеристик среды и очага, средняя форма спектра реакции. Большинство исследований относится к максимальной горизонтальной компоненте, в то же время вопросы, касающиеся второй горизонтальной и вертикальной компоненты, остаются плохо изученными. Большая путаница наблюдается в работах, посвященных частотному составу колебаний и зависимостям преобладающего периода от свойств очага и среды. До сих пор открытым остается вопрос о влиянии продолжительности колебаний на сейсмический эффект. Эти параметры сейсмического движения грунта в силу недостаточности знаний о них практически не используются в теории и практике сейсмостойкого строительства. Несмотря на широкое практическое использование, работы, посвященные коэффициенту динамического усиления, его связи с другими параметрами колебаний и зависимостям от параметров очага и среды, практически отсутствуют:

3. наблюдается резкое повышение интереса к скорости колебаний грунта. Однако этот параметр еще мало исследован. Основная масса работ посвящена уравнениям затухания скоростей, а исследования отдельных характеристик этого параметра сейсмических колебаний практически отсутствуют.

**Постановка задач диссертации.** Проведенный анализ литературных данных указывает на то, что решение проблемы повышения точности прогноза количественных характеристик сейсмических воздействий, на которые нацелена данная диссертационная работа, требует решения следующих задач:

исследование пиковых ускорений колебаний грунта, включая общие закономерности формирования и распространения сейсмических колебаний от очага землетрясения, выражением которых должен стать закон затухания ускорений в ближней и дальней зонах для землетрясений различной интенсивности;

исследование соотношения уровня различных компонент и установление зависимостей таких соотношений от свойств очага и среды;

исследование продолжительности колебаний и установление соответствующих корреляционных соотношений для прогноза этого параметра;

исследование спектров реакции ускорений с использованием средней формы спектра, включая внутренние соотношения между отдельными характеристиками

спектра, такими как ширина спектра, преобладающий период, коэффициент динамического усиления;

исследование коэффициента динамического усиления: зависимость его величины от различных параметров очага и среды, а также от параметров записи ускорений (продолжительности и уровня колебаний) и спектральных характеристик (преобладающего периода, ширины спектра, количества циклов колебаний);

исследование скоростей колебаний - установление закономерностей затухания пиковых скоростей, исследование соотношения различных компонент скорости от факторов среды и очага, а также исследование влияния этих же факторов на величину продолжительности колебаний в скоростях; разработка соответствующих корреляционных соотношений для практического применения;

исследование спектров реакции в скоростях – установление средней формы спектра скорости, рассмотрение зависимостей величин преобладающего периода, коэффициента динамического усиления от различных факторов очага и среды, установление соотношений между отдельными характеристиками спектра, разработка соответствующих корреляционных уравнений.

В завершение исследований следует разработать методики прогнозирования параметров сейсмических колебаний для практического применения, основанные на корреляционных соотношениях, полученных в результате решения поставленных в диссертационной работе задач. Все устанавливаемые корреляционные уравнения должны сопровождаться оценкой стандартного отклонения для определения доверительного уровня таких соотношений.

**Во второй главе** обосновывается выбор метода исследования, его особенности, использованная база данных и методика их обработки.

Существующие методы прогноза параметров сейсмических колебаний могут быть разделены на 4 группы, каждая из которых включает несколько вариантов.

Наиболее традиционным является использование инструментальной шкалы сейсмической интенсивности. Для конкретного объекта метод имеет то преимущество, что повторяемость интенсивности определяется довольно точно, поскольку для происшедших землетрясений обрабатываются данные о конечных сейсмических эффектах на площадке объекта. Недостатком метода является неоднозначность связи между сейсмической интенсивностью и ускорением грунта.

Оценка параметров колебаний на основе представительного ансамбля записей местных землетрясений может быть реализована лишь при наличии густой сети станций сильных движений и продолжительного срока наблюдений. Но даже в этом случае наличие нескольких местных акселерограмм не гарантирует того, что резонансная частота будущего землетрясения совпадет с таковой для одной из имеющихся записей. При подборе реальных записей, полученных в сходных условиях, возникает необходимость при помощи различных теоретических предположений привести отобранные записи к местным условиям, что также не повышает точности результатов.

Оценка параметров колебаний может проходить и на основании обобщенных спектров, построенных после совместной обработки реальных акселерограмм, местных и/или записанных в других регионах в сходных условиях. При этом возникает ошибка, связанная с осреднением уровней отдельных спектров на каждой из частот, в результате чего занижается уровень “среднего” спектра, а полоса частот расширяется.

Модельные расчеты, в основе которых лежат теоретические соотношения, получаемые при решении упрощенного волнового уравнения, в настоящее время очень популярны, потому что разработано множество моделей очага, и для реализации таких методик не требуется проведения дорогостоящих полевых работ. Существующие теоретические модели слишком упрощены: значительные ошибки в оценке амплитуды вызваны предположением, что сейсмическая энергия излучается плоскостью разрыва, а не некоторым объемом, вмещающим разрыв. Немалые погрешности возникают также и при оценке ожидаемого спектра. Если после генерирования ансамбля синтетических акселерограмм расчетный спектр получают осреднением уровней отдельных спектров на каждой из частот, это неизбежно вызывает расползание спектра и снижение его уровня. Одной из разновидностей модельных методов является комбинированный метод построения расчетного спектра, когда резонансная частота сейсмических колебаний считается равной собственной частоте сооружения. Остальные параметры подбираются по тем или иным соображениям. Этот метод наиболее консервативный: ведь собственный период построенного объекта в общем случае отличается от расчетного, а с течением времени еще и меняется; сооружение может иметь несколько резонансов. Принимаемые к расчету сейсмические воздействия при этом далеки от реальных.

Выделяется еще одна группа методов прогноза количественных характеристик сейсмического движения грунта, которая основана на использовании статистических оценок параметров колебаний и включает в себя теоретические, полуэмпирические и эмпирические методы. При реализации первых двух эмпирическим путем подбираются коэффициенты для заранее выбранного математического выражения. В чисто эмпирическом методе формулы заранее не выбираются, и лишь на конечном этапе возможна аппроксимация эмпирического закона подходящими выражениями. Эмпирические уравнения основываются на распределении амплитуд зарегистрированных движений по магнитудам и расстояниям. При использовании этого метода учитывается все возможное естественное многообразие параметров среды и очага. Чем более обширная база данных используется, тем шире класс вариаций параметров охватывается, тем точнее прогноз. Важнейшим достоинством метода является оценка среднеквадратичного отклонения для любой рассматриваемой характеристики колебаний, а также возможность задать воздействия с любым интересующим при решении конкретной задачи уровнем непревышения по различным параметрам. При наличии записей местных землетрясений величина стандартных отклонений существенно уменьшается. Наибольшей погрешностью обладают теоретические формулы ( $\sigma(PGA) \approx 0.3$  ед. десятичного логарифма), в то время как современные полуэмпирические формулы имеют ошибку  $\sigma(PGA) \approx 0.25$  ед. десятичного логарифма, а ошибка эмпирических формул составляет всего лишь  $\sigma(PGA) \approx 0.17$  ед. десятичного логарифма. Таким образом, методы, основанные на статистических оценках эмпирических данных, сейчас являются наиболее точными.

Исследовать процесс колебаний при землетрясениях можно, не только детально описывая сейсмическую запись целиком, но и применяя метод параметризации, когда рассматриваются отдельные характеристики записей и для изучения выбираются из них те, с помощью которых можно описать особенности сейсмических колебаний. К параметрам, характеризующим сейсмический эффект, можно отнести ускорения, скорости, смещения движений грунта, которые могут быть исследованы по записям приборов, регистрирующих сейсмические колебания. Закономерности, описывающие сейсмический процесс, записываются с

использованием одних и тех же независимых переменных - основных параметров движения грунта при землетрясении.

Для параметризации сейсмических процессов в работе [Аптикаев, 1981] предложены следующие параметры: амплитуда, преобладающий период и продолжительность колебаний. Из эмпирических оценок для преобладающих периодов  $T$  и продолжительности колебаний  $\tau$  можем получить не зависящую от масштаба явления характеристику - количество  $n$  циклов колебаний, соответствующих преобладающему периоду:  $n = \tau / T$ . Поскольку  $n$  величина безразмерная, зависимость величин  $\tau$  и  $T$  от магнитуды (имеется в виду коэффициент пропорциональности) должна быть одинаковой. Влияние параметра, характеризующего движение механической системы, - массы - при такой параметризации не рассматривается, поскольку изменять эту величину возможно только в лабораторных условиях.

Пиковое ускорение грунта, преобладающий период (или частота) и продолжительность колебаний (ширина импульса) в ускорениях можно рассматривать согласно методу параметризации как основные параметры колебаний. Аналогично, в качестве главных независимых параметров при изучении скоростей сейсмических колебаний могут быть приняты пиковая скорость грунта, преобладающий период (или частота) скорости и продолжительность колебаний (ширина импульса) в скоростях.

Для смещений подобные исследования не проводились, поскольку основное количество записей сильных движений получено с применением аппаратуры, плохо пропускающей длиннопериодные колебания.

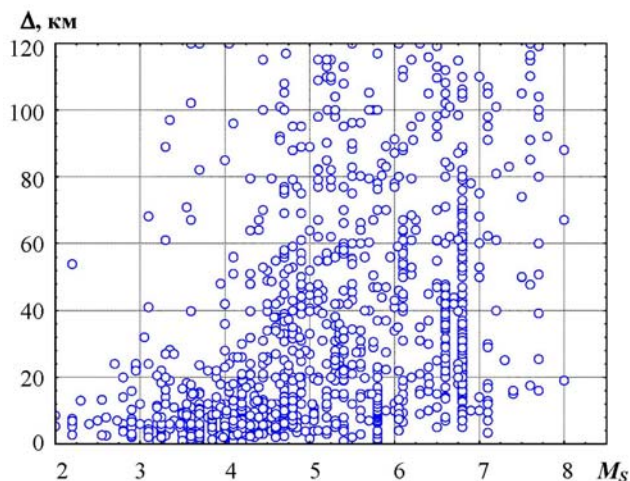
Параметризация может быть применена и к спектру реакции, который характеризуется преобладающей частотой колебаний, шириной полосы частот (шириной спектра) и максимальным уровнем спектральной амплитуды.

После нормирования спектров по преобладающему периоду и максимальной спектральной амплитуде, все полученные в результате спектры будут различаться только формой - величиной безразмерной. Форма спектра будет наиболее простой в том случае, когда используется двойной логарифмический масштаб. Она характеризуется, в основном, двумя безразмерными величинами: коэффициентом динамического усиления и логарифмической шириной спектра. Последняя определяется не разницей граничных частот, а их отношением. Удобно измерять ширину спектра на уровне 0.5 от максимального, на котором оценки имеют наибольшую стабильность. Полученный нормированный спектр не зависит от масштабов явления. Поэтому все спектры можно обработать совместно, независимо от магнитуды, и установить среднюю форму спектра, среднее значение коэффициента динамического усиления и среднюю ширину спектра.

В более ранних работах диссертанта [Аптикаев, Эртелева, 2008] установлено, что спектры реакции ускорений можно рассматривать как симметричные относительно преобладающего периода. Логарифмическая ширина спектра является стабильной величиной и составляет  $S = 0.60 \pm 0.24$ . Коэффициенты корреляции ширины спектра  $S$  с магнитудой и логарифмом кратчайшего расстояния к поверхности разрыва - всего 0.13. Значение  $S$  для грунтов III и IV категорий несколько больше, чем для грунтов I и II категорий, и для взбросов несколько больше, чем для сбросов. Близкие результаты были получены и в работах [Аптикаев, Михайлова, 1985; Аптикаев, Эртелева, 2001] с использованием других выборок

данных сильных движений, что свидетельствует об устойчивости приведенных оценок.

Эмпирическая база данных параметров сильных движений грунта, явившаяся основой предлагаемой работы, содержит сведения о сейсмических событиях с различными механизмами очага, магнитудами, расстояниями и грунтовыми условиями из разных регионов мира (рис. 1). Диапазон использованных магнитуд составляет  $2 \leq M_S \leq 8$ , кратчайшее расстояние до плоскости разрыва  $R_{кр}$  находится в диапазоне  $0.01 \leq R_{кр}, \text{ км} \leq 100$ , диапазон эпицентральных расстояний - до 175 км.



**Рисунок 1.** Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта (2541 событие).

При составлении базы данных использовались данные из систематических каталогов, монографий и сборников, посвященных отдельным землетрясениям, наборы записей отдельных землетрясений на CD дисках или выложенные в сети Internet, записи, полученные Эпицентральной сейсмологической экспедицией ИФЗ РАН при полевых работах в различных районах России и за рубежом, например, при работах в эпицентральных областях Спитакского 1988 г., Рачинского 1991 г., Сусамырского 1992 г., Шикотанского 1994 г., Нефтегорского 1995 г., Калининградского 2004 г. землетрясений. При выполнении Российско-Индийских проектов были получены записи сильных движений Индии; а при выполнении Румынско-Российско-Молдавского проекта - записи сильных движений некоторых землетрясений зоны Вранча. Диск записей сильных движений был получен из Университета Южной Калифорнии, имеющего собственную сеть станций.

Использованный набор данных содержит сведения о 5618 записях сильных движений грунта от 2905 землетрясений различных регионов мира за период с 1933 года по настоящее время, среди которых, например, 213 землетрясений Камчатки и Курильских островов, 55 землетрясений Сахалина, 147 землетрясений района Байкала, 342 землетрясения Кавказа, 270 землетрясений Средней Азии и Казахстана, 60 землетрясений Пакистана, 720 землетрясений Ирана, 307 землетрясений Индии, 637 землетрясений Японии, 27 землетрясений Балкан, 76 землетрясений Европы, 507 землетрясений Калифорнии и др. Количество данных по разным землетрясениям различно. Определения глубины имеются для 4371 записи. События, вошедшие в базу данных, в основном, коровые. Однако имеются также сведения о глубокофокусных землетрясениях зоны Вранча - 27 записей от 11 событий. Из общего числа данных только 2312 записей имеют сведения о механизме очага.

Разнообразны данные и по грунтовым условиям в точке регистрации, хотя не все записи имеют такую характеристику (всего 2880 определений). К тому же,

приводимая в описаниях характеристика грунтов зачастую очень нечеткая. Примером такого описания могут служить грунты типа “аллювий”. Наиболее ясно характеризуются грунты III и IV категорий – т.н. “слабые грунты.” В конечном итоге была применена классификация грунтов по сейсмическим свойствам согласно нормам СП 14.13330.2018. Использование такой упрощенной характеристики грунтов было вызвано неоднородностью имеющихся в распоряжении источников данных, вследствие чего применить классификацию грунтов по средней скорости в верхнем 30-метровом слое грунтовой толщи  $V_S$  [Boore et al., 1997] не представилось возможным.

В идеале каждая строка описываемого набора данных должна содержать различные сведения о землетрясении: дата, время в очаге; район, где произошло сейсмическое событие; глубина очага; набор магнитуд по различным типам волн, глубина очага, механизм очага, различные определения расстояний, описания грунтов и так далее; характеристики записей и спектров ускорений, скоростей и смещений для трех компонент – всего 67 параметров, включая дополнительные. Конечно, идеальные ситуации встречаются далеко не всегда. В литературных источниках нередко точно описаны всевозможные параметры, связанные с ускорением грунта, но отсутствуют сведения о скоростях и смещениях. Поэтому выборка по скоростям из этой базы данных содержит сведения только о 3670 сейсмических событиях. Кроме того, количество событий при корреляции различных величин также не оставалось постоянным вследствие неполноты исходных.

В работе рассматривалось влияние на параметры сейсмических колебаний магнитуды, расстояния, механизма очага, грунтовых условий.

Для приведения к единообразию использованных данных применялись следующие процедуры. Все расстояния были приведены в километрах; амплитуды ускорений в  $\text{см}/\text{с}^2$ , скоростей в  $\text{см}/\text{с}$  и т.д. Используемое в работе при установлении законов затухания ускорений и скоростей нормированное расстояние (для каждого события) представляет собой кратчайшее до поверхности разлома расстояние, отнесенное к величине магнитуды события с некоторым коэффициентом. Отметим, что коэффициенты, применяемые при исследовании ускорений и скоростей считались различными. Поскольку такое преобразование данных позволяет исключить влияние магнитуды, то данные всех магнитуд обрабатываются совместно.

Оценки амплитуд ускорений, пересчитанные из амплитуд смещений или скоростей в предположении возможности аппроксимации колебаний синусоидой, были исключены, поскольку установлено [Аптикаев, 1972], что подобные операции порождают систематическую ошибку – занижение величины амплитуд.

Частотный состав характеризуется преобладающим периодом и шириной спектра.

Известно, что оценки магнитуд  $M_S$  и  $M_{LH}$  в среднем совпадают. Поэтому все энергетические оценки были приведены к магнитуде по поверхностным волнам  $M_{LH}$ . В качестве оценки  $M_S$  принималось среднее значение из  $M_S$  и  $M_{LH}$  с округлением с точностью до 0.1 в сторону оценки  $M_{LH}$  по работе [Аптикаев, 2012], где была проведена корреляция различных магнитудных шкал с использованием метода медиан. В случае отсутствия оценок магнитуд по поверхностным волнам, в качестве  $M_{LH}$  принималось среднее из пересчитанных оценок по другим шкалам.

Глубина очага выбиралась из бюллетеня Международного сейсмологического центра, Беркшир, Великобритания; если оценка отсутствовала, то оценки, полученные другими службами, осреднялись.

Противоречащие друг другу определения механизма очага различных агентств исключались из обработки. Прочие различающиеся определения объединялись в механизмы смешанного типа (например, взброс и сдвиг соединялся в взбрососдвиг).

Кроме метода медиан, для получения корреляционных зависимостей использовались компьютерные программы множественной корреляции.

В ходе исследований применялось понятие подобия из теории подобия и размерностей, см., например, [Седов, 1987]: при изучении физических явлений два явления считаются подобными, если по известным параметрам одного из них можно получить соответствующие параметры второго путем пересчета. Чтобы осуществить такой переход, необходимо использовать соответствующий числовой коэффициент - масштабирующий множитель. Согласно теории подобия и размерностей безразмерные параметры имеют одинаковое численное значение для рассматриваемой совокупности подобных явлений - не зависят от масштабов явления.

#### **Выводы по второй главе:**

1. приведена классификация существующих методов прогноза параметров сейсмических колебаний;

2. наиболее достоверные результаты дает использование статистических оценок параметров сейсмической записи в зависимости от характеристик очагов и среды. Важнейшим достоинством метода является оценка среднеквадратичного отклонения для любого параметра колебаний;

3. описан использованный в исследовании метод параметризации, обоснован выбор изучаемых параметров сильного движения грунта. В качестве таковых при исследованиях записей сейсмических колебаний приняты: уровень колебаний, преобладающая частота колебаний, продолжительность колебаний (или ширина импульса). При исследованиях спектров реакции сейсмических колебаний в качестве основных параметров приняты коэффициент динамического усиления  $\beta$  и логарифмическая ширина спектра;

4. в основные параметры сильных движений грунта введен безразмерный параметр колебаний – количество циклов;

5. описана выборка данных по сильным движениям грунта, использованная в работе, и методика обработки.

**Третья глава** посвящена исследованию характерных черт ускорений грунта. По имеющейся базе данных параметров сильных движений грунта было проанализировано распределение логарифмов пиковых амплитуд ускорений ( $\lg PGA$ ) с использованием закона нормирования расстояний, который выглядит следующим образом:

$$\lg R^* = \lg R_{кр} - 0.33 M_s, \quad (1)$$

где  $R_{кр}$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома,  $R^*$  – нормированное расстояние.

При этом выделяются три зоны с существенно различными затуханиями, зависящими от уровня колебаний. В каждой зоне рассматривается зависимость  $\lg PGA$  только от расстояния, поскольку на нормированных расстояниях амплитуды не зависят от магнитуды.

В качестве первого шага этой процедуры были выбраны только данные, полученные от землетрясений со сдвиговым механизмом и зарегистрированные на грунтах III и IV категорий по сейсмическим свойствам (чтобы исключить влияние на результаты таких факторов как механизм очага и тип грунта). На втором этапе изучалось влияние грунтовых условий в пункте регистрации, для чего были



проанализированы распределения пиковых ускорений землетрясений сдвигового типа, но полученные на грунтах других категорий. В результате было установлено, что затухание в первых двух зонах не зависит от типа грунта. Влияние же грунтовых условий на уровень  $PGA$  существенно в дальней зоне. На третьем этапе исследовалась зависимость затухания пиковых ускорений от механизма очага. В результате автором было установлено, что влияние типа механизма очага важно только в первой зоне. Предложено назвать ее разломной. В этой зоне  $PGA$  возрастает с расстоянием, что отмечалось и в других работах [Артикаев, Erteleva, 2007; Graizer, Kalkan, 2007, 2011]. В этой зоне каждый элемент среды излучает энергии больше, чем поглощает. Поэтому распространяющаяся волна постоянно имеет энергетическую подпитку, которая и выражается в увеличении  $PGA$ . Уравнение затухания в общем случае для разломной зоны может быть записано в виде:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_o + 0.27 \lg R^* \pm 0.18, \quad (2)$$

где  $C_o$  – постоянная, зависящая от механизма очага.

Значения постоянной  $C_o$ , минимальные и максимальные значения  $PGA$  в разломной зоне приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Закон затухания  $PGA$  в разломной зоне.**

Механизм очага	$C_o$	$PGA_{\text{мин}}$	$PGA_{\text{макс}}$
Взброс	3.45	437	871
Сдвиг	3.30	309	661
Сброс	3.15	219	536

Далее в ближней зоне вплоть до границы с дальней зоной амплитуды ускорения убывают, но закон затухания  $PGA$  не зависит от типа грунта и механизма очага. Соответствующее корреляционное уравнение имеет вид:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 1.75 - 0.63 \lg R^* \pm 0.15. \quad (3)$$

Максимальное значение наблюдается на границе разломной и ближней зон ( $R_1^*$ ). Положение границы  $R_1^*$  разломной зоны определяется именно типом механизма очага. Используя уравнения (2) и (3), получаем:

$$\lg R_1^* = (1.75 - C_o) / 0.90. \quad (4)$$

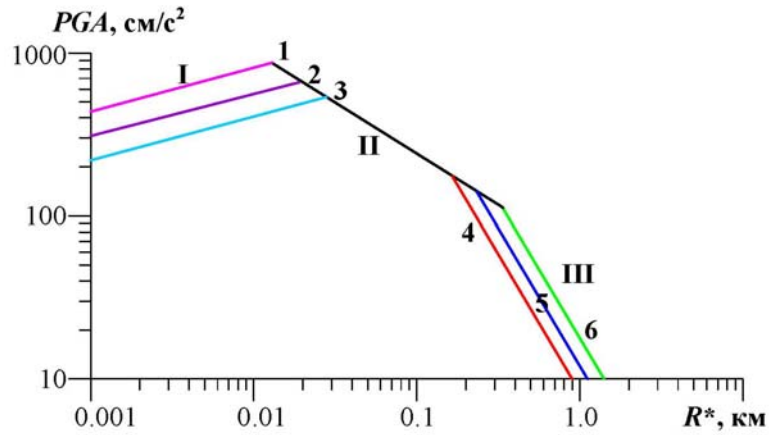
где  $C_o$  - как и выше, постоянная, зависящая от механизма очага.

Полученный эмпирический закон затухания для  $PGA$  показан на рис. 2. Как видно, границы между зонами выделяются довольно четко. В ближней зоне амплитуды уменьшаются с расстоянием, но по степени меньше 1, т.е. затухание незначительно. На расстоянии около  $R^* = 0.2$  км от разлома на грунтах I категории, где  $PGA = 175 \text{ см/с}^2$ , затухание резко возрастает. Эти числовые характеристики точки излома можно считать инвариантными для ближней зоны, поскольку они не зависят от магнитуды, расстояния и грунтовых условий.

Зону с повышенным затуханием принято называть дальней. В отличие от ближней зоны в ней не происходит выделение энергии. Для других категорий грунта точки излома расположены дальше. В дальней зоне влияние типа вспарывания на уровень  $PGA$  не наблюдается. Значение  $PGA$  зависит от грунтовых условий:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_2 - 1.69 \lg R^* \pm 0.20, \quad (5)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта в точке наблюдения и равная 0.92 для грунтов I-ой, 1.08 для грунтов II-ой и 1.25 – для грунтов III-ей и IV-ой категорий.



**Рисунок 2.** Закон затухания пиковых амплитуд ускорений грунта  $PGA$ .

$I$  – разломная зона,  $II$  – ближняя зона,  $III$  – дальняя зона; 1 – взброс, 2 – сдвиг, 3 – сброс, 4 – грунты I-ой, 5 – грунты II-ой, 6 – грунты III-ей и IV-ой категорий.

Тип грунта определяет и положение границы между ближней и дальней зоной ( $R_2^*$ ). Используя выражения (3) и (5), имеем:

$$\lg R_2^* = (C_2 - 1.75) / 1.03, \quad (6)$$

где  $C_2$  – как и выше, постоянная, зависящая от типа грунта.

На расстояниях за пределами дальней зоны деформации малы, и уровень амплитуд отражает внутреннюю структуру Земли. В этой зоне масштабирование амплитуд производится вдоль оси амплитуд в соответствии с определением магнитуды. Поэтому экстраполяция данных из зоны малых деформаций в область сильных движений затруднена.

Следует заметить, что в полученных уравнениях затухания коэффициенты при  $\lg R$  соответствуют изменению амплитуды на единицу расстояния. Это вполне оправдано для ближней и разломной зон, где преобладают процессы выделения энергии. Однако в дальней зоне необходимо учитывать еще изменение амплитуды на расстоянии, равном длине волны, то есть декремент поглощения. Поскольку длина волны зависит от магнитуды, то и декремент поглощения должен зависеть от магнитуды. Напомним, что зависимость степени затухания амплитуды от значения магнитуды ранее отмечено Ю.К. Черновым (1984, 1989).

Коэффициент затухания  $k$  в простейшей форме можно записать в виде:

$$k = k_1 + k_2 / \lg \lambda, \quad (7)$$

где  $\lambda = v T_0$  ( $v$  – скорость распространения волны).

Однако, как будет показано ниже, в дальней зоне  $\lg T_0 \sim 0.17 M_S$ . Тогда

$$k = c - 0.17 M_S, \quad (8)$$

где  $c$  – коэффициент, определяемый по эмпирическим данным и учитывающий влияние различных факторов.

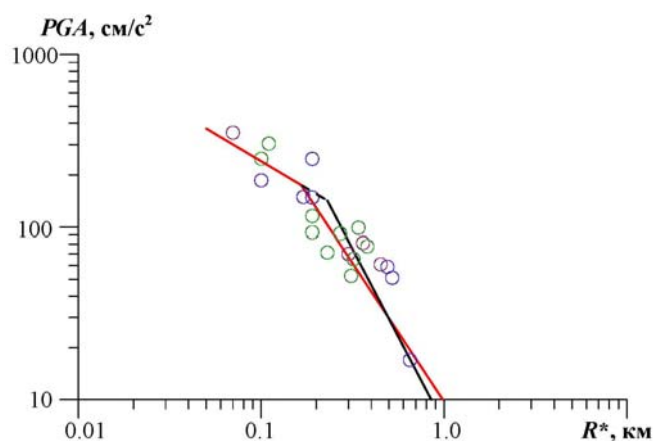
Следовательно, в дальней зоне с ростом магнитуды уменьшается коэффициент затухания. В среднем для  $c$  получено значение 2.76. Итак, для дальней зоны затухание  $PGA$  может быть описано эмпирической формулой:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_2 - (2.76 - 0.17 M_S) \lg R^* \pm 0.20, \quad (9)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта в точке наблюдения и описанная в формуле (5).

Напомним, что установленные закономерности затухания и соответствующие им корреляционные уравнения получены по совокупности данных из разных регионов мира и, следовательно, носят среднестатистический, обобщенный характер. Их можно назвать среднемировыми. Для того чтобы показать применимость полученной кривой затухания в различных регионах, были выбраны данные отдельных районов, не использовавшиеся при построении среднемировой кривой затухания - данные по сильным землетрясениям северо-запада Индии (Дхарамсала, 26.04.1986 ( $M_S = 5.4$ ,  $h = 5$  км), Уттаркаши, 20.10.1991 ( $M_S = 6.8$ ,  $h = 14$  км) и Чамоли, 28.03.1999 ( $M_S = 6.7$ ,  $h = 8$  км)); Ирана (Бам 26.12.2003 г. ( $M_S = 6.8$ ,  $M_W = 6.6$ ) и другие) и данные по сильным движениям при Венчуанском землетрясении, Китай, 12.05.2008,  $M_S = 8.0$ . Все события были записаны местными сетями станций сильных движений. По данным первых двух районов были проведены процедуры, аналогичные описанным выше, и построены региональные кривые затухания.

На рис. 3 в качестве примера показана кривая затухания для северо-западных Гималаев и исходные данные. Как видно, кривая состоит из 2 участков. Уравнение затухания для разломной зоны не получено в связи с отсутствием данных. Имеющиеся эмпирические данные для ближней зоны малочисленны, поэтому проведение аппроксимирующей прямой с их использованием было бы статистически необоснованным. Однако имеющиеся данные хорошо согласуются со среднемировой зависимостью.



**Рисунок 3.** Затухание пиковых ускорений грунта землетрясений северо-западных Гималаев. Розовые, зеленые, фиолетовые кружки – пиковые ускорения грунта землетрясений Чамоли, 1999; Уттаркаши, 1991; Дхарамсала, 1986 соответственно. Черная линия - кривая затухания для дальней зоны по данным местных землетрясений, пунктирная линия – экстраполяция участка ближней зоны; красная – кривая затухания для ближней и дальней зон на грунтах I-ой категории по формулам (3) и (9) соответственно.

На рис. 3 видно, что точка, после которой наблюдается резкое затухание пиковых амплитуд, расположена на расстоянии около  $R^* = 0.2$  км и соответствует положению границы между ближней и дальней зоной (см. рис. 2). Аппроксимирующая прямая для ближней зоны практически совпадает с прямой, соответствующей уравнению (3). Стандартное отклонение не превышает 0.1 ед. десятичного логарифма.

Региональное корреляционное уравнение для дальней зоны имеет вид:

$$\lg(PGA, \text{см/с}^2) = 1.115 - 1.64 \lg R^* \pm 0.10. \quad (10)$$

На рис. 3 также показан участок кривой затухания в дальней зоне на грунтах I-ой категории, построенный по мировым данным:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 0.989 - 1.604 \lg R^* \pm 0.20. \quad (11)$$

Очевидно, что, различия в оценках амплитуд по формулам (10) и (11) незначительны. Следовательно, среднемировые кривые затухания достаточно хорошо описывают затухание и в этом районе. Использование только местных данных ведет к уменьшению стандартного отклонения.

Построение кривой затухания для Ирана приводит к аналогичному выводу. Наконец, данные Венчуанского землетрясения, нанесенные на среднемировые кривые затухания, показывают хорошую с ними согласованность: стандартное отклонение для ближней зоны  $\sigma = 0.14$  ед. десятичного логарифма, а для дальней зоны  $\sigma = 0.20$  ед. десятичного логарифма.

Таким образом, соответствующие численные коэффициенты региональных уравнений затухания не выходят за пределы стандартных отклонений, соответствующих среднемировой кривой затухания. Однородность данных и компактность района исследований способствуют уменьшению величин стандартных отклонений региональных уравнений. Во всех случаях надежно выделяются зоны с существенно разными законами затухания. Следовательно, можно сделать вывод, что установленные закономерности волнового поля сейсмических колебаний характерны для любых регионов мира, и уровни пиковых ускорений грунта могут быть оценены по среднемировым соотношениям.

Различия же в законах затухания для одного и того же района при использовании единой кривой, полученных различными авторами, при прочих равных условиях могут быть объяснены различиями в количестве используемых данных, представленных в каждой зоне: разломной, ближней и дальней. Различная представительность для разных зон определяет параметры кривой затухания.

При рассмотрении соотношения амплитуд грунта на различных компонентах установлено, что для двух ортогональных горизонтальных компонент такое отношение подчиняется логнормальному закону с нулевым средним значением и стандартным отклонением 0.15 ед. десятичного логарифма. В среднем амплитуды на двух случайно ориентированных горизонтальных компонентах равны. Среднегеометрическое значение двух горизонтальных компонент всего на 13% ниже максимального значения. Отношение ускорений на двух ортогональных горизонтальных компонентах  $H_{\text{макс}}$  и  $H_2$  имеет вид:

$$\lg (PGA_{H_{\text{макс}}} / PGA_{H_2}) = 0.18 - 0.09 \lg R + 0.001 M \pm 0.11, \quad (12)$$

где  $R$  – гипоцентрально расстояние.

Как видно, отношение ускорений на двух горизонтальных компонентах слабо зависит расстояния и практически не зависит от магнитуды.

Анализ соотношения ускорений грунта на максимальной горизонтальной  $PGA_{H_{\text{макс}}}$  и вертикальной  $PGA_{\text{верт}}$  компонентах показал [Эртелева, 2011], что при относительно слабых колебаниях ( $PGA_{H_{\text{макс}}} \leq 250 \text{ см/с}^2$ ) значение его не зависит от уровня и  $PGA_{H_{\text{макс}}} / PGA_{\text{верт}} = 2$ . Для более интенсивных колебаний эмпирические данные можно аппроксимировать выражением:

$$PGA_{\text{верт}} = 44 + 0.0147PGA_{H_{\text{макс}}} + 0.0011PGA_{H_{\text{макс}}}^2 \text{ при } PGA_{H_{\text{макс}}} > 250 \text{ см/с}^2, \quad (13)$$

где  $PGA_{H_{\text{макс}}}$  - пиковое ускорение на наиболее интенсивной горизонтальной компоненте,  $\text{см/с}^2$ ;  $PGA_{\text{верт}}$  - ускорение на вертикальной компоненте,  $\text{см/с}^2$ .

Полученные результаты являются практически совпадающими с результатами других авторов [Mikhailova, Aptikaev, 1996]. Учитывая, что были использованы

выборки данных из разных регионов, можно сделать вывод: уровень колебаний - фактор, определяющий соотношение между горизонтальной и вертикальной компонентами. Значимой зависимости исследуемого соотношения от магнитуды не обнаружено. Соответствующие корреляционные уравнения имеют вид:

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) = 0.342 + 0.0003 \lg R_{кр} \pm 0.24. \quad (14)$$

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) = 0.55 - 0.03 M_S \pm 0.25. \quad (15)$$

В дальнейшем, при исследовании зависимости отношения  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}$  от различных факторов, согласно полученным результатам, все данные были разделены на 2 группы, чтобы исключить влияние уровня колебаний: записи с пиковым ускорением грунта на наиболее интенсивной горизонтальной компоненте  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$  и записи, для которых  $PGA_{H\max} > 250 \text{ см/с}^2$ . В первой группе среднее отношение  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}} = 2$  и, следовательно, уже не зависит от уровня колебаний. Во второй – наоборот, эта зависимость весьма значительна, и поэтому предварительно необходимо исключить влияние уровня колебаний. С этой целью была использована разность между наблюдаемым вертикальным ускорением  $PGA_{\text{набл}}$  и рассчитанным с использованием уравнения (13) значением вертикального ускорения  $PGA_{\text{расч}}$  (или иначе  $\lg(PGA_{\text{набл}} / PGA_{\text{расч}})$ ). Полученное значение рассматривалось как функция различных факторов.

Было установлено, что при равенстве горизонтальных ускорений амплитуда вертикального ускорения на рыхлых грунтах в среднем в 1.3 раза меньше, чем на скальных. Впрочем, это различие много меньше величины стандартного отклонения, равного 0.21 для скальных и 0.25 ед. десятичного логарифма для рыхлых грунтов. При учете влияния уровня колебаний для любого типа грунта  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}} \approx 2$  для первой группы записей. Для второй группы записей отклонение значения  $\lg (PGA_{\text{набл}} / PGA_{\text{расч}})$  от среднего составляет 0.03 ед. десятичного логарифма, что очень мало по сравнению со стандартным отклонением, равным 0.24 и 0.25 ед. десятичного логарифма для скальных и рыхлых грунтов соответственно. Таким образом, не наблюдается зависимости соотношения уровней горизонтальной и вертикальной компонент от типа грунта.

Из имеющейся базы данных были организованы выборки по различным типам механизмов очага: взбросы, сдвиги, сбросы. Зависимости  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}$  от типа механизма очага не обнаружено, и изучаемое отношение и в этом случае определяется уровнем колебаний.

Продолжительность колебаний  $\tau$  в ускорениях была рассмотрена отдельно для ближней и дальней зоны. При этом оценивалось влияние на продолжительность магнитуды, расстояния (бралось кратчайшее расстояние до поверхности разрыва для повышения точности оценок) и грунтовых условий. Анализ проводился аналогично тому, как это было сделано при изучении затухания амплитуд: организовывались выборки по типу механизма очага, и в каждой полученной группе отдельно рассматривались данные, относящиеся к разным грунтовым условиям, и строились уравнения аппроксимирующих прямых для каждой подгруппы. В результате получили, что продолжительность колебаний в дальней зоне может быть оценена следующим корреляционным соотношением:

$$\lg \tau = 0.17M_S + 0.5 \lg R + C_1 + C_2 - 1.43 \pm 0.30, \quad (16)$$

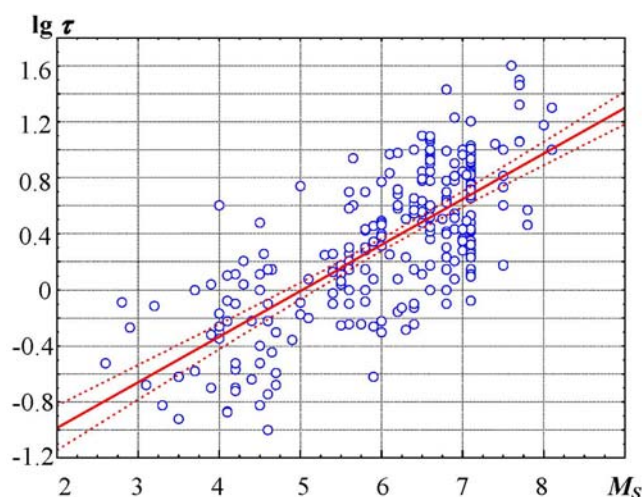
где  $M_S$  – магнитуда землетрясения;  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разрыва;  $C_1$  – постоянная, отражающая влияние механизма очага:  $C_1 = 0.25$  для

сбросов,  $C_1 = 0.00$  для сдвигов и  $C_1 = -0.25$  для взбросов;  $C_2$  – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий:  $C_2 = -0.15$  для грунтов I-ой,  $C_2 = 0.00$  – II-ой и  $C_2 = 0.4$  – III-ей и IV-ой категории.

Аналогично проведенная процедура в ближней зоне приводит к выводу, что здесь зависимость от расстояния несущественна:

$$\lg \tau, \text{ с} = 0.282 M_S - 0.012 \lg R - 1.381 \pm 0.30. \quad (17)$$

Зависимость продолжительности в ближней зоне только от магнитуды, без учета влияния механизма очага и грунтовых условий, представлена на рис. 4.



**Рисунок 4.** Зависимость продолжительности колебаний в ускорениях от магнитуды в ближней зоне (264 события).

*Штриховые линии - 95%-ный доверительный интервал для аппроксимирующей линии.*

Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\lg \tau, \text{ с} = 0.33 M_S - 1.63 \pm 0.29. \quad (18)$$

В уравнении (18) не учтено влияние грунтовых условий на значение свободного члена, равного в общем случае  $C = -1.63$ . Для выборки данных с грунтами I-ой категории получаем, что  $C = -1.67 \pm 0.38$ , а для грунтов III-ей категории  $C = -1.63 \pm 0.38$ .

Как видно, разница между свободным членом уравнения (18) и полученными оценками этой же величины для разных категорий грунта незначительна. Следовательно, в ближней зоне влиянием грунтовых условий при оценке продолжительности колебаний можно пренебречь. Аналогично оценивая влияние типа механизма очага на величину  $\tau$ , получаем для выборки данных с механизмом очага взброс  $C = -1.57 \pm 0.31$ , а для сбросов  $C = -1.69 \pm 0.26$ . Как видно, разница в коэффициентах  $C$  значительно меньше величины стандартного отклонения. Следовательно, в этой зоне и влиянием механизма очага при оценке  $\tau$  можно пренебречь.

Таким образом, продолжительность колебаний в ближней зоне определяется в основном магнитудой землетрясения.

Проведя с данными по преобладающим периодам процедуру, примененную при изучении закона затухания амплитуд и продолжительности колебаний в ускорениях, диссертант получил, что в дальней зоне преобладающий период ускорений может быть оценен следующим уравнением:

$$\lg T_0 = 0.17 M_S + 0.25 \lg R + C_1 + C_2 - 2.6 \pm 0.20, \quad (19)$$

где  $R_{кр}$  – кратчайшее расстояние до поверхности разрыва;  $C_1$  – коэффициент, отражающий влияние механизма очага:  $C_1 = -0.10$  для взбросов,  $C_1 = 0.00$  для сдвигов,  $C_1 = 0.10$  для сбросов;  $C_2$  – коэффициент, отражающий влияние грунтовых условий:  $C_2 = -0.05$  для грунтов I-ой,  $C_2 = 0.00$  – II-ой и  $C_2 = 0.05$  для грунтов III-ей и IV-ой категорий.

Заметим, что по сравнению с предыдущими работами диссертанта с соавторами существенных изменений в оценке преобладающих периодов в дальней зоне не произошло, и полученное уравнение носит уточняющий характер.

Исследование спектров ускорений было проведено с использованием 748 спектров горизонтальных компонент с 5% затуханием. Эмпирические распределения параметров спектров аппроксимировались распределением Гаусса.

Анализ значения коэффициента динамического усиления  $\beta$  для двух горизонтальных компонент показал, что распределение величины  $\lg \beta$  для максимальной горизонтальной компоненты составляет  $\lg \beta = 0.56 \pm 0.10$  ( $\beta = 3.63$ ), а для второй горизонтальной компоненты  $\beta = 3.4$ . Эмпирическое значение стандартного отклонения при этом составляет около 26%.

Наименьшее значение  $\beta$  имеет для механизмов сдвигового типа, а наибольшее – для механизмов сбросового и взбросового типов.

Зависит  $\beta$  и от типа грунта: на грунтах III и IV категории значение этого параметра наиболее низкое ( $\beta = 3.4$ ), на скальных (I категория) – наиболее высокое ( $\beta = 3.7$ ), а для грунтов II категории  $\beta$  имеет промежуточное значение ( $\beta = 3.6$ ). Это и понятно, поскольку скальные грунты отличаются более высокой добротностью. Заметим, что принятому в отечественных нормах постоянному для любых ситуаций значению  $\beta = 2.5$  соответствует только 5% эмпирических данных.

Для исследования зависимости значения коэффициента  $\beta$  на горизонтальных компонентах от уровня ускорения были построены распределения величины  $\lg \beta$  для различных интервалов  $\lg PGA$ , шириной в 0.3 ед. десятичного логарифма и шагом 0.2 ед. десятичного логарифма в диапазоне значений  $1.0 < \lg PGA < 3.0$ . Установлено, что с ростом уровня колебаний коэффициент  $\beta$  уменьшается от значения 3.6 до 2.8. Резкое изменение величины  $\beta$  происходит при значении  $PGA \approx 175 \text{ см/с}^2$ , что соответствует границе между ближней и дальней зонами.

Зависимость значения коэффициента  $\beta$  от продолжительности  $\tau$  рассматривалась в диапазоне значений  $-1.4 < \lg \tau < 1.6$  для различных интервалов  $\lg \tau$  шириной в 0.3 ед. десятичного логарифма и шагом 0.2 ед. десятичного логарифма. Было установлено, что при малых продолжительностях коэффициент  $\beta$  мал:  $\beta = 2.6$  при  $\lg \tau = -1.3$ . С ростом продолжительности этот коэффициент растет и при  $\tau = 1.3$  с достигает значения  $\beta = 3.8$ , а при дальнейшем росте остается постоянным, равным этому значению, но стандартное отклонение несколько увеличивается, достигая 0.11 ед. десятичного логарифма.

Связь значений  $\beta$  и преобладающего периода  $T_0$  несущественна:

$$\lg \beta = 0.53 - 0.04 \lg T_0 \pm 0.1. \quad (20)$$

Связь  $\beta$  и ширины спектра  $S$  для всех имеющихся данных имеет вид:

$$\lg \beta = 0.80 - 0.39 S \pm 0.08. \quad (21)$$

Как видно, рассматриваемая зависимость существенна: чем шире спектр (т.е. чем больше его ширина), тем ниже коэффициент  $\beta$ .

Для того чтобы оценить влияние количества циклов на величину коэффициента динамичности, аналогично предыдущему для различных интервалов  $\lg n$  шириной в

0.3 ед. десятичного логарифма и шагом 0.2 ед. десятичного логарифма были построены распределения величины  $\lg \beta$ . Использование количества циклов удобно тем, что эта величина безразмерная и не зависит от магнитуды землетрясения. Было установлено, что если колебания представлены одним периодом, то коэффициент динамичности минимален  $\beta = 2.7$ . С увеличением количества циклов этот коэффициент возрастает до  $\beta = 3.7$  при 5 циклах, после чего остается постоянным, равным этому значению.

#### **Выводы по третьей главе:**

1. установлен единый для всех магнитуд закон затухания пиковых амплитуд ускорений грунта в эпицентральной области землетрясения. Анализ эмпирического распределения амплитуд, показал, что волновое поле делится на 3 зоны с различными законами затухания волн. Оценено значение региональных особенностей затухания;

2. исследованы зависимости между пиковыми амплитудами ускорений на различных компонентах в зависимости от уровня колебаний; магнитуды; расстояния; типа грунта и механизма очага, и установлены корреляционные соотношения;

3. рассмотрены особенности вертикальной компоненты колебаний, предложено эмпирическое корреляционное выражение для оценки ее уровня в зависимости от уровня максимальной горизонтальной компоненты;

4. впервые установлены зависимости продолжительности колебаний ускорений в ближней зоне от различных параметров среды и очага;

5. уточнено уравнение для оценки преобладающих периодов колебаний;

6. впервые установлены зависимости величины коэффициента динамического усиления от различных факторов.

**В четвертой главе** исследовались скорости сейсмических колебаний. Прежде всего была обоснована возможность масштабирования амплитуд  $PGV$ . Из теории известно, что по определению значение пиковой скорости  $PGV$  пропорционально выражению  $PGA \times T_0$ :

$$PGV \sim PGA \times T_0, \quad (22)$$

где  $T_0$  - преобладающий период ускорения.

Но, согласно результатам, изложенным в главе 3, период на фиксированном расстоянии зависит от магнитуды землетрясения:

$$\lg T_0 \sim 0.17 M_S, \quad (23)$$

а пиковые ускорения  $PGA$  масштабируются с коэффициентом  $0.33 M_S$ . Тогда из формул (22) - (23) имеем:

$$\lg PGV \sim (0.33 + 0.17) M_S. \quad (24)$$

Следовательно, можно ожидать, что пиковая скорость пропорциональна значению магнитуды с коэффициентом 0.50:

$$\lg PGV \sim 0.50 M_S. \quad (25)$$

Из приведенных теоретических соотношений следует, что пиковые скорости так же, как и ускорения, подчиняются закону масштабирования, но с коэффициентом 0.50. Для проверки справедливости полученного выражения зафиксируем значение магнитуды, чтобы рассмотреть затухание  $PGV$  в зависимости только от одной переменной – расстояния  $R$ . Из имеющейся базы данных по скоростям сильных движений грунта организуем 2 выборки для магнитуд  $M_S = 5.0 \pm 0.5$  и  $M_S = 7 \pm 0.5$ . Аппроксимирующие прямые для полученных групп точек  $\lg (PGV)_5$  и  $\lg (PGV)_7$ , соответствующих указанным выборкам по магнитудам, имеют вид:



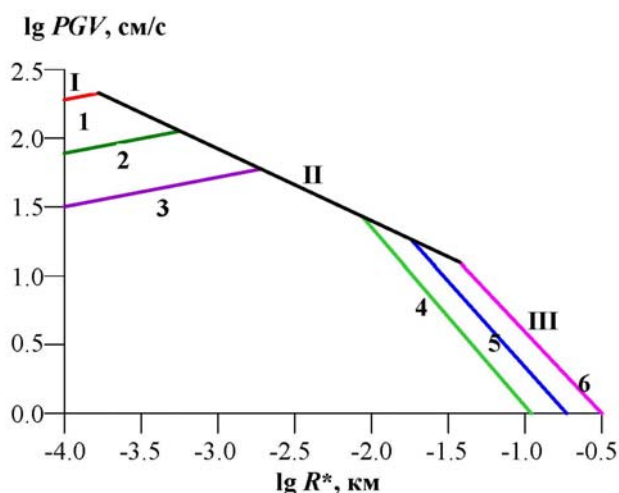
$$\lg (PGV, \text{см/с})_5 = 1.94 - 1.00 \lg R. \quad (26)$$

$$\lg (PGV, \text{см/с})_7 = 2.90 - 1.00 \lg R. \quad (27)$$

Коэффициенты при расстоянии в уравнениях (26) и (27) совпадают, и эти линии могут быть совмещены сдвигом вдоль оси расстояния примерно на  $0.50 \lg R$  на 1 единицу магнитуды. Следовательно, аналогично  $PGA$ , установлен закон масштабирования для пиковых скоростей: кривые затухания для разных магнитуд можно, совместить сдвигом не по оси амплитуд, а по оси расстояний, используя при этом нормированные расстояния ( $R^*$ ):

$$\lg R^* = \lg R - 0.50 M_s. \quad (28)$$

Для вывода закона затухания пиковых скоростей используем нормированные расстояния. Чтобы исключить влияние различных факторов, выделим из имеющейся базы данных группы по типу механизма очага: сдвиг, взброс, сброс. Каждую из этих групп будем рассматривать отдельно. И, наконец, разделим каждый полученный таким образом набор данных по типу грунта по сейсмическим свойствам (I, II и III - IV категории). Все поле скоростей, как и в случае  $PGA$ , можно разделить на 3 зоны, в каждой из которых затухание амплитуд протекает по своим законам. По аналогии с  $PGA$  назовем их разломная, ближняя и дальняя зоны. Амплитуды  $PGV$  с расстоянием от разлома сначала возрастают от некоего минимального значения до максимального, затем начинается небольшое затухание. В дальней зоне с ростом расстояния затухание становится более резким. Если рассмотреть картину затуханий  $PGV$  для тех же сдвиговых землетрясений, но для других категорий грунтов, то можно сделать вывод, что в дальней зоне затухание скоростей определяется типом грунта, а в первых двух зонах такого влияния не обнаруживается. Аналогичную процедуру проведем с ансамблями данных по другим механизмам очагов. В результате приходим к выводу, что при любых механизмах очага для пиковых скоростей выделяются 3 зоны с различными типами затухания амплитуд (рис. 5).



**Рисунок 5.** Закон затухания пиковых скоростей.

*I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона; 1 – взброс, 2 – сдвиг, 3 – сброс;  
4 – грунты I категории, 5 – грунты II категории, 6 – грунты III и IV категорий;  
 $R^*$  - нормированное расстояние ( $\lg R^* = \lg R - 0.50 M_s$ ).*

В разломной зоне уровень пиковой скорости определяется механизмом очага, уровень амплитуд возрастает от минимального значения, зависящего от типа механизма, до максимального значения на границе с ближней зоной. При этом уровень скоростей не зависит от типа грунта:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = C_V + 0.20 \lg R^*, \quad (29)$$

где  $R^*$  - нормированное расстояние (формула (28)),  $C_V$  – постоянная, зависящая только от типа подвижки в очаге:  $C_V = 3.10$  для взбросов,  $C_V = 2.70$  для сдвигов и  $C_V = 2.30$  для сбросов.

Отметим, что эти оценки получены по небольшому количеству исходных данных, поэтому стандартное отклонение для этой зоны не вычислено. В этой зоне процессы излучения энергии преобладают над процессами поглощения, и в результате амплитуда колебаний возрастает с расстоянием.

Однако с ростом амплитуды, согласно законам механики, возрастает и декремент поглощения, и в ближней зоне амплитуда скорости начинает медленно убывать по эмпирическому закону:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = 0.36 - 0.52 \lg R^* \pm 0.14. \quad (30)$$

В этой зоне не обнаружено значимой зависимости затухания  $PGV$  от механизма очага и грунтовых условий. Положение границы между разломной и ближней зоной  $R_1^*$  зависит от типа подвижки в очаге землетрясения и может быть определено как точка пересечения прямых, описываемых уравнениями (29) и (30):

$$\lg R_1^* = (0.36 - C_V) / 0.72. \quad (31)$$

где постоянная  $C_V$  определяется механизмом очага.

Значения постоянной  $C_V$ , минимальные и максимальные значения  $PGV$  приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Закон изменения  $PGV$  в разломной зоне.**

Механизм очага	$C_V$	$PGV_{\text{мин}}, \text{см/с}$	$PGV_{\text{макс}}, \text{см/с}$
Взброс	3.10	190.5	213.8
Сдвиг	2.70	77.6	112.2
Сброс	2.30	31.6	59.6

В дальней зоне уравнение затухания имеет вид:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = C_2 - 1.12 \lg R^* \pm 0.14, \quad (32)$$

где  $R^*$  - нормированное расстояние (формула (28)),  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта:  $C_2 = -0.74$  для грунтов II-ой,  $C_2 = -0.98$  для грунтов I-ой и  $C_2 = -0.50$  для грунтов III-ей и IV-ой категорий.

В дальней зоне преобладают процессы поглощения энергии, зависящие от уровня колебаний, поэтому затухание колебаний очень сильно. Влияния типа механизма очага на затухание амплитуд скоростей  $PGV$  не наблюдается. Уровень кривых затухания здесь определяется грунтовыми условиями в точке наблюдения, влияние которых характеризуется свободными членами уравнений затухания. По эмпирическим данным эти различия по отношению к средним грунтам составляют примерно 80%. Очевидно, что различие в приращении амплитуды вследствие грунтовых условий не соответствует принятому положению об изменении амплитуды на 1 балл. На самом деле изменение интенсивности связано не только с изменением амплитуды, но и с изменением продолжительности колебаний на различных грунтах.

Наклон графика затухания в дальней зоне должен зависеть от магнитуды. Пока экспериментального материала недостаточно для оценки этого фактора. Для имеющейся выборки наклон графика близок к 1.12.

Положение второго излома кривых затухания  $R_2^*$  между ближней и дальней зоной может быть определено как точка пересечения прямых, описываемых формулами (30) и (32):

$$\lg R_2^* = (C_2 - 0.36) / 0.60. \quad (33)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта (см. уравнение (32)).

В результате исследования диссертантом установлено, что отношение амплитуд скоростей на горизонтальных компонентах по набору всех имеющихся данных выражается соотношением:

$$\lg (PGV_{H_{\max}} / PGV_{H_2}) = -0.0017M_S + 0.0043 \lg R + 0.1611 \pm 0.11, \quad (34)$$

где  $PGV_{H_{\max}}$  – максимальная по уровню горизонтальная компонента,  $PGV_{H_2}$  – вторая горизонтальная компонента.

Можно сделать вывод, что отношение уровней горизонтальных компонент скорости практически не зависит ни от магнитуды, ни от расстояния.

Максимальная горизонтальная компонента на 43% превышает вторую горизонтальную компоненту, а значение уровня второй горизонтальной компоненты можно определить по формуле:

$$\lg PGV_{H_2} = \lg PGV_{H_{\max}} - 0.15 \pm 0.11. \quad (35)$$

Полученное соотношение – практически функциональная зависимость: коэффициент корреляции составляет  $r = 0.99$ .

Как было показано ранее (рис. 5), характер затухания скоростей зависит от того, какая зона рассматривается. Приняв во внимание, что наибольшее количество данных относится к ближней и дальней зонам, и исследовав взаимосвязь амплитуд на горизонтальных компонентах в каждой из этих зон, получили:

$$\lg PGV_{H_2} = \lg PGV_{H_{\max}} - 0.20 \pm 0.11 \text{ для ближней зоны,} \quad (36)$$

$$\lg PGV_{H_2} = \lg PGV_{H_{\max}} - 0.15 \pm 0.11 \text{ для дальней зоны.} \quad (37)$$

Как видно, отношение  $PGV_{H_2}$  и  $PGV_{H_{\max}}$  практически не зависит ни от магнитуды события, ни от расстояния.

Среднее значение отношения амплитуд колебаний  $PGV_{\text{верт}}$  и  $PGV_{H_{\max}}$  составляет  $\lg (PGV_{\text{верт}} / PGV_{H_{\max}}) = -0.43$  ед. десятичного логарифма, стандартное отклонение  $\sigma = 0.21$  ед. десятичного логарифма.

Значение пиковой амплитуды вертикальной компоненты примерно на 60% меньше пикового значения более интенсивной горизонтальной компоненты:

$$\lg PGV_{\text{верт}} = 0.82 \lg PGV_{H_{\max}} - 0.29 \pm 0.29. \quad (38)$$

Коэффициент корреляции при этом составляет  $r = 0.87$ . С расстоянием разница в уровнях между вертикальной и максимальной горизонтальной компонентами возрастает, т.е. вертикальная растет быстрее, а с ростом магнитуды, наоборот, уменьшается:

$$\lg (PGV_{\text{верт}} / PGV_{H_{\max}}) = 0.19 \lg R - 0.06 M_S - 0.38 \pm 0.33. \quad (39)$$

Однако, как видно из формулы (39), зависимость от магнитуды незначительна, что и неудивительно, поскольку безразмерная величина не должна зависеть от масштаба явления.

Зависимость от расстояния требует дополнительного изучения. Связь отношения амплитуд в дальней зоне с расстоянием описывается уравнением:

$$\lg (PGV_{верт} / PGV_{Hмакс}) = 0.08 \lg R - 0.57 \pm 0.28. \quad (40)$$

Как видно, изменение величины  $\lg(PGV_{верт} / PGV_{Hмакс})$  не превышает стандартного отклонения. Аналогичная картина наблюдается и в ближней зоне. Итак, зависимостью от расстояния также можно пренебречь.

Заметим, что магнитуда и расстояние в уравнении (39) коррелируются: малые магнитуды регистрируются только на малых расстояниях. Как было показано, зависимости величины  $\lg (PGV_{верт} / PGV_{Hмакс})$  и от расстояния, и от магнитуды несущественны. Поэтому уравнение (39) неадекватно описывает реальные зависимости. Недаром распределение величины  $\lg (PGV_{верт} / PGV_{Hмакс})$  (см. формулу (38)) без учета каких-либо факторов имеет более низкое стандартное отклонение.

Рассмотрим соотношение уровней вертикальной и максимальной горизонтальной компонент в ближней и дальней зонах отдельно. Имеем:

$$\lg PGV_{верт} = 1.20 \lg PGV_{Hмакс} - 0.85 \pm 0.14 \text{ в ближней зоне,} \quad (41)$$

$$\lg PGV_{верт} = 0.78 \lg PGV_{Hмакс} - 0.25 \pm 0.20 \text{ в дальней зоне.} \quad (42)$$

При исследовании зависимости продолжительности колебаний в скоростях от магнитуды и расстояний диссертантом установлено: возрастание продолжительности колебаний в дальней зоне связано, прежде всего, с удалением от очага:

$$\lg \tau_v = 0.12 M_S + 0.40 \lg R - 0.88 \pm 0.40. \quad (43)$$

В ближней зоне анализ эмпирических данных показал, что зависимость продолжительности колебаний от расстояния практически отсутствует. Следовательно, ближнюю зону можно рассматривать как излучающее тело. Полученная эмпирическая формула имеет вид:

$$\lg \tau_v = 0.20 M_S - 0.74 \pm 0.23. \quad (44)$$

Можно отметить следующую тенденцию: в ближней зоне чем больше магнитуда (т.е. чем больше выделяющаяся энергия), тем продолжительнее процесс колебания. Зависимость от других факторов, как это было сделано для ускорений, изучить не удалось из-за недостатка данных.

При изучении спектров реакции в скоростях, прежде всего, были рассмотрены асимметрия и крутизна склонов спектра. Были проанализированы распределения логарифмической полуширины спектра в области длинных  $S_2$  и коротких  $S_1$  периодов на всех уровнях от  $0.1 SA_{макс}$  до  $0.9 SA_{макс}$  с шагом 0.1, а также распределение величины  $S_1 - S_2$  на тех же уровнях. Установлено, что спектр скорости несимметричен: на уровне половины максимума длиннопериодная часть является более широкой (почти в 2 раза) по сравнению с короткопериодной и остается открытой в сторону длинных периодов примерно на уровне  $0.37 SV_{макс}$ . Говорить о полной логарифмической ширине спектра скорости  $S$  имеет смысл выше указанного уровня. На более низких уровнях форма спектра описывается лишь шириной короткопериодной части. Величина длиннопериодной полуширины спектра всегда больше величины короткопериодной полуширины, т.е. асимметрия спектра сохраняется на всех уровнях. По сравнению со спектром ускорения спектр скорости по частотному составу в целом оказывается значительно шире (примерно в 1.5 раза).

Среднее значение коэффициента  $\beta$  для спектров скорости составляет примерно 2.8 (рис. 6), величина стандартного отклонения – примерно 32%. Среднее значение коэффициента динамического усиления второй горизонтальной компоненты составляет 2.98, величина стандартного отклонения – примерно 30%.



**Рисунок 6.** Распределение  $\lg \beta$  (303 события).  
Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.45 \pm 0.12$ .

При исследовании влияния уровня скорости на величину коэффициента динамического усиления  $\beta$  установлено, что все имеющиеся значения  $\lg \beta$  в функции  $\lg PGV$  различны в ближней и дальней зонах. Примерно после того как пиковая скорость достигает значения  $PGV_{Hmax} \approx 20$  см/с, величина  $\beta$  начинает резко уменьшаться. Возможно, такая скорость соответствует границе очага. Точнее установить эту границу не удалось вследствие недостатка данных.

Заметная связь  $\beta$  и преобладающего периода отсутствует. Тем не менее, можно говорить о некотором снижении коэффициента  $\beta$  с увеличением периода.

С ростом ширины спектра  $S$  коэффициент  $\beta$  уменьшается (полученный результат довольно стабилен: коэффициент корреляции составляет  $r \approx -0.73$ ):

$$\lg \beta = 0.39 - 0.36 \lg S \pm 0.08. \quad (45)$$

Анализ соотношения величин  $\lg \beta$  и  $\lg \tau$  показал, что при малых продолжительностях коэффициент  $\beta$  мал: ( $\beta = 1.8$  при  $\lg \tau \leq -1.0$ ). С ростом продолжительности этот коэффициент растет и при  $\tau = 0.5$  с ( $\lg \tau = 0.3$ ) достигает значения  $\beta = 2.9$ . При дальнейшем росте он остается постоянным, равным этому значению, но стандартное отклонение несколько увеличивается, достигая 0.13 ед. десятичного логарифма.

В результате исследования связи  $\beta$  с количеством циклов  $n$  установлено, что минимальное значение коэффициента  $\beta = 1.7$  наблюдается в случае, когда в колебаниях выделяется по амплитуде только один экстремум. С ростом числа циклов до 3 – 4 коэффициент возрастает примерно до 2.8. При больших значениях  $n > 10$  коэффициент  $\beta$  достигает своего максимального значения  $\beta = 3.0$ . Но таких значений немного. Среднее количество циклов в очаговой области 3 - 4.

Зависимость преобладающего периода скорости от магнитуды и расстояния в дальней зоне описывается уравнением:

$$\lg T_0(PGV) = 0.18 M_S + 0.08 \lg R - 1.38 \pm 0.29. \quad (46)$$

Коэффициент корреляции соотношения (46) высок и составляет  $r = 0.81$ .

Как и следовало ожидать, преобладающий период возрастает с ростом магнитуды и удалением от очага.

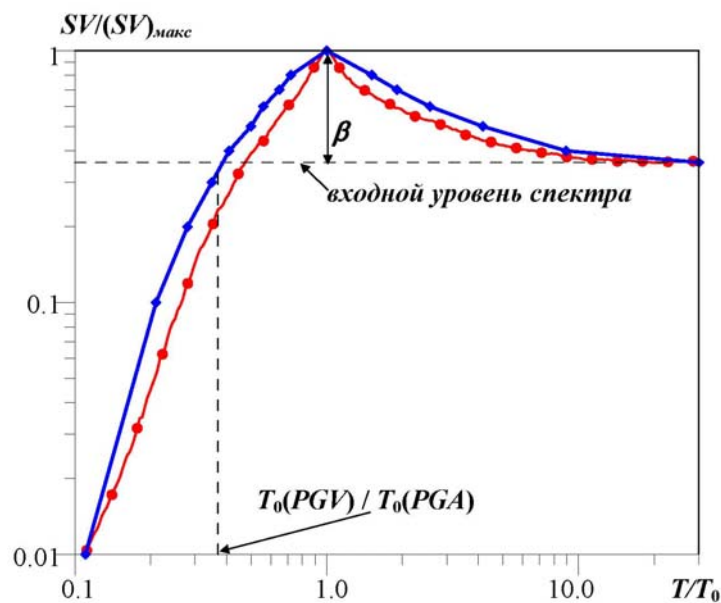
В ближней зоне зависимость  $\lg T_0(PGV)$  от расстояния не обнаружена, зависимость от магнитуды описывается выражением:

$$\lg T_0(PGV) = 0.31 M_S - 1.84 \pm 0.20. \quad (47)$$

Коэффициент корреляции  $r = 0.64$ . В ближней зоне каждый элемент среды выделяет энергию. В дальней зоне затухание резко возрастает.

Преобладающие периоды горизонтальных компонент практически совпадают: преобладающий период на более интенсивной горизонтальной компоненте ( $T_0(PGV_{H\max})$ ) больше на 6.5 % при стандартном отклонении 0.26 ед. десятичного логарифма. Следовательно, разницей в преобладающих периодах колебаний на горизонтальных компонентах можно пренебречь. Преобладающий период вертикальной компоненты скорости на 26% (в 1.26 раза) превосходит преобладающий период горизонтальной компоненты. Следует особо отметить, что при использовании других выборок данных были получены аналогичные результаты – в скоростях вертикальная компонента оказывается более длиннопериодной по сравнению с горизонтальными компонентами. Этот факт может быть объяснен тем, что на записях скоростей в рассматриваемом диапазоне волна  $S$  распадается на  $SH$  – и  $SV$ -волны, имеющие различный частотный состав.

Применяя метод медиан к совокупности рассчитанных и затем нормированных спектров реакции, находим средние значения нормированных амплитуд по столбцам и строкам. Полученные множества и дают нам среднюю форму спектра реакции в скоростях (рис. 7).



**Рисунок 7.** Форма спектра реакции в скоростях.

*Красная линия – медианы по столбцам, голубая линия – медианы по строкам.*

Как видно, в области длинных периодов ( $\approx 10 T / T_0$ ) оба варианта формы спектра – по столбцам и по строкам – близки. Причем, если провести асимптотическую прямую на уровне  $\approx 0.37 SV / SV_{\max}$ , то, как следует из анализа численных значений, уровень ее соответствует входному уровню спектра, т.е. определяется входным значением  $PGV$ , а величина отрезка от спектрального максимума до этой асимптотической линии является коэффициентом динамического усиления  $\beta$ . На длиннопериодной ветви от уровня 0.5 спектр спадает по степени 1/3. В короткопериодной части спектра имеется точка перегиба (абсцисса ее составляет  $T_0(PGV) / T_0(PGA) \approx 2.7$ ), которая по своему численному значению соответствует точке максимума спектра реакции в ускорениях. После этой точки наклон спектра меняется, спадание происходит по степени 2.5. Для уровней  $SV / (SV)_{\max} < 0.37$  спектр

открыт в область длинных периодов. Видно, что периоды, соответствующие максимальным амплитудам смещений, в имеющейся выборке практически отсутствуют. Сказывается ограничение частотной характеристики акселерографов.

Согласно рис. 7, на уровне входного сигнала, если за истинное значение спектральной кривой принять середину расстояния между линиями медиан, то максимальная ошибка по оси периодов не превысит 12%.

#### **Выводы по четвертой главе:**

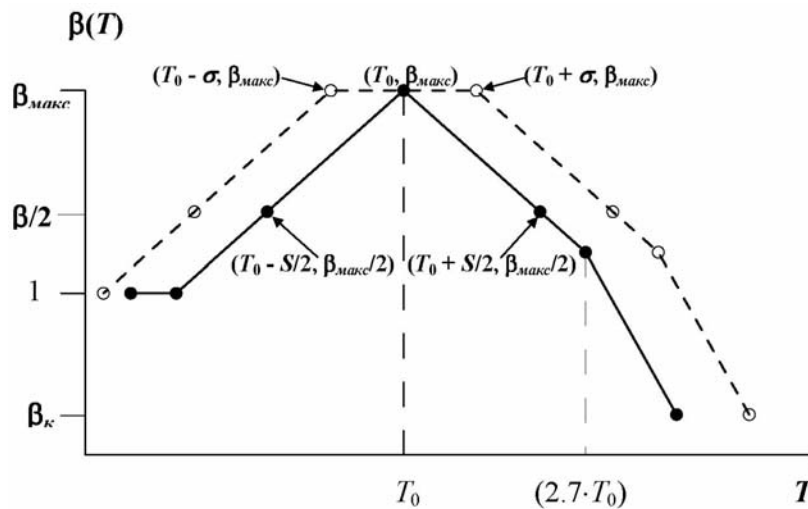
1. установлен закон масштабирования пиковых амплитуд скоростей грунта;
2. установлен закон затухания скоростей в эпицентральной области землетрясений. Показано, что при распространении волн существуют 3 зоны с различными законами затухания. Оценены значения скорости, характеризующие границы между зонами;
3. впервые установлена средняя форма спектра реакции в скоростях. Оценены основные параметры спектра, найдены их средние значения и соответствующие стандартные отклонения;
4. оценены различия в уровнях различных компонент. Среднее различие в уровне горизонтальных компонент скоростей составляет 43%. Уровень вертикальной компоненты на 60% меньше уровня максимальной горизонтальной компоненты;
5. в дальней зоне преобладающий период скорости зависит от магнитуды и расстояния. В ближней зоне преобладающий период зависит только от магнитуды, зависимость от расстояния не обнаружена. Получены корреляционные уравнения для преобладающих периодов. Установлены различия между преобладающими периодами различных компонент;
6. в дальней зоне продолжительность колебаний скорости зависит от магнитуды и расстояния, а в ближней - определяется только магнитудой события;
7. оценены средние значения коэффициента динамического усиления (демпфирование 5%). Определены факторы, влияющие на величину коэффициента  $\beta$ : ширина спектра, преобладающий период, продолжительность колебаний, уровень колебаний, и разработаны эмпирические соотношения для оценки влияния этих факторов.

**В пятой главе** излагается метод прогноза параметров сильных движений грунта, основанный на анализе имеющегося эмпирического материала в районе исследования. В случае недостатка или отсутствия местных данных для расчета прогнозных значений ожидаемых параметров сейсмических колебаний используются среднемировые зависимости. Заключительный этап - построение локального спектра реакции с использованием результатов, полученных при исследовании ускорений и скоростей (см. главы 3 и 4) и учетом грунтовых условий.

При построении локальных спектров реакции в ускорениях принимается во внимание, что основными характеристиками спектра являются уровень, преобладающая частота, ширина спектра, дополнительной - асимметрия спектра. Средние ожидаемые значения параметров колебаний и соответствующие стандартные отклонения определяются по эмпирическим соотношениям в зависимости от магнитуды, типа подвижки в очаге, расстояния и грунтовых условий. При наличии записей сильных движений, полученных в районе исследований, точность прогнозных оценок параметров сейсмических колебаний существенно возрастает. Если записи местных землетрясений отсутствуют, можно использовать среднемировые соотношения. Величина стандартного отклонения при этом, естественно, увеличится.

Основой методики построения ожидаемого локального спектра реакции в ускорениях являются характерные особенности средней формы спектра, нормированного по преобладающему периоду и уровню входного сигнала: симметричность относительно преобладающего периода  $T_0$ , стабильность величины коэффициента динамического усиления  $\beta$  и ширины спектра  $S$ . Среднемировые данные (см. главы 2, 3) -  $\beta = 3.6$  при 5%-ном уровне демпфирования и  $S = 0.60$  ед. десятичного логарифма при стандартном отклонении 0.20 ед. десятичного логарифма. При построении спектра в двойном логарифмическом масштабе склоны хорошо аппроксимируются отрезками прямых, они примерно пропорциональны периоду колебаний. На длиннопериодной ветви спектра имеется точка излома, определяемая как  $2.7 \cdot T_0$  и соответствующая преобладающему периоду скорости. Кроме того, для построения ожидаемого спектра необходимо оценить ожидаемый уровень ускорения грунта и преобладающий период колебаний.

Построение спектра реакции ускорения начинается с точки, соответствующей спектральному максимуму и имеющей координаты  $(T_0, \beta_{\max})$  (рис. 8). Затем строим точки с координатами  $(T_0 - S/2, \beta_{\max}/2)$  и  $(T_0 + S/2, \beta_{\max}/2)$ , определяющие ширину спектра на уровне полумаксимумы ( $\beta_{\max}/2$ ). От вершины спектра через указанные точки проводим отрезки до предварительно заданного уровня (от спектрального максимума) ( $\beta_k$ ). На длиннопериодном склоне полученного таким образом спектра строим точку излома, имеющую абсциссу  $(2.7 \cdot T_0)$ , после которой уровень спектра определяется квадратом текущего периода.



**Рисунок 8.** Схема построения спектра реакции в ускорениях.

*Сплошная линия – наиболее вероятный спектр (50%-ная вероятность спектрального состава), штриховая – спектр реакции с 67%-ной вероятностью спектрального состава.*

Чтобы учесть неопределенность в положении преобладающего периода, рассматриваем интервал периодов, в который с заданной вероятностью попадет преобладающий период: вместо ожидаемого с вероятностью  $p = 0.5$  преобладающего периода задаемся доверительным интервалом  $\lg T_0 \pm n\sigma(\lg T_0)$ , где  $n$  - количество стандартных отклонений. Обычно достаточно взять  $n = 1.0$ . Величина стандартного отклонения для оценки преобладающего периода равна 0.2 ед. десятичного логарифма, если используются среднемировые оценки, и 0.12 ед. десятичного логарифма, если используются записи местных землетрясений.

Тогда склоны спектра задаются от концов интервала, в котором ожидается преобладающий период, а ширина спектра расширяется за счет доверительного



интервала. При этом сам спектр может быть задан с любым заранее выбранным уровнем доверия. Кроме того, обычно с инженерной точки зрения считается целесообразным уровень спектра для  $T \leq 0.03$  с принять равным пиковому ускорению грунта. Стандартное отклонение для уровня колебаний не вводится, поскольку магнитудный потенциал зоны ВОЗ уже задается в качестве максимально возможного (для выбранного периода повторяемости).

При необходимости спектры реакции и для двух горизонтальных компонент, и вертикальной компоненты могут быть оценены отдельно, используя результаты главы 3. На практике обычно обе горизонтальные компоненты принимают равными по уровню. На локальный спектр может быть наложена резонансная характеристика грунтов, оцениваемая в результате сейсмического микрорайонирования (СМР).

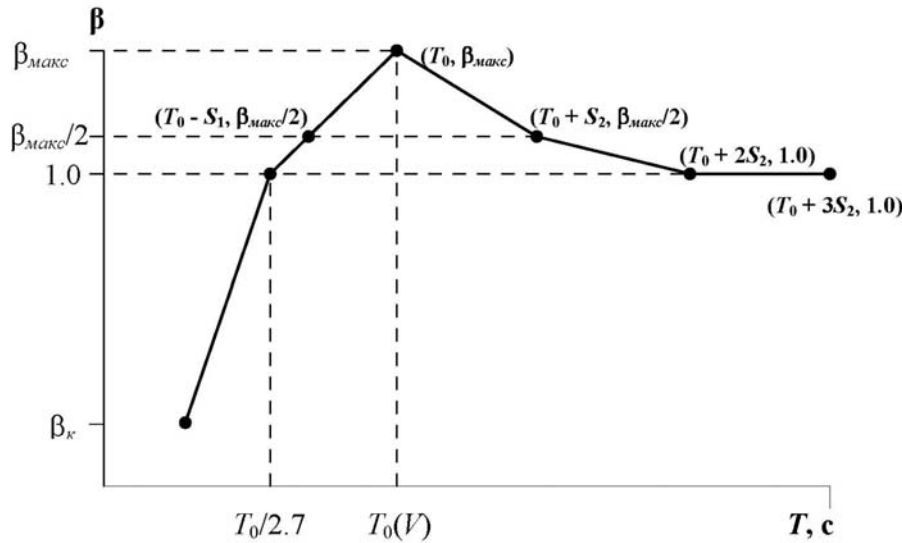
Аналогичные вычисления могут быть проведены при необходимости для расчетов спектров реакции с различными уровнями демпфирования.

В качестве иллюстрации применения изложенной методики приведен пример построения локального ожидаемого спектра реакции при демпфировании 5% для одного из сильнейших афтершоков (13.06.95 г.,  $t_0 = 21^ч-35^{мин}$ ) Нефтегорского землетрясения 1995 г. на станции Нефтегорск. Полученный спектр практически совпал с реальным.

Аналогично предыдущему расчет среднего спектра реакции по скоростям проводится на основании средних эмпирических оценок его параметров. Однако спектр скоростей имеет, как это следует из результатов главы 4, более сложное строение: он несимметричен и требует большего количества характерных точек для своего построения. Асимметрия может быть охарактеризована различием в короткопериодной  $S_1$  и длиннопериодной  $S_2$  полуширине спектра. При построении спектра оцениваются (см. главу 4): ожидаемый период колебаний  $T_0$  с соответствующим стандартным отклонением  $\pm \sigma(T_0)$ ; локальный коэффициент динамического усиления  $\beta$ ; локальная логарифмическая ширина спектра  $S$ , а также полуширины спектра  $S_1$  и  $S_2$  (желательно на нескольких уровнях, включая уровень  $0.5S$  от максимального). Если же для района исследования эмпирически такие зависимости установить нельзя, то можно использовать среднемировые соотношения. Кстати, наши оценки затухания амплитуд в различных регионах мира показали, что влияние местных условий в эпицентральных зонах мало, поскольку согласно законам механики декремент поглощения при высоких амплитудах определяется уровнем колебаний, а не свойствами среды. При построении спектра скорости учтем среднюю форму спектра: на короткопериодной ветви спектра имеется точка излома, определяемая как  $T_0 / 2.7$  и соответствующая преобладающему периоду ускорения; коэффициент динамического усиления  $\beta$  для скорости колебаний по среднемировым данным составляет 2.8 при 5%-ном уровне демпфирования; логарифмическая ширина спектра на уровне 0.5 от максимального по тем же данным составляет примерно 3 октавы или 0.94 ед. десятичного логарифма, при этом короткопериодная полуширина спектра составляет 0.32 ед. десятичного логарифма, а длиннопериодная - 0.62 ед. десятичного логарифма; на уровне  $\beta = 1$  проходит асимптотическая линия, соответствующая уровню входного сигнала спектра  $PGV$ .

Построение спектра скорости (рис. 9) начинаем с точки, соответствующей спектральному максимуму и имеющей координаты  $(T_0, \beta_{\max})$ . Точки с координатами  $(T_0 - S_1, \beta_{\max}/2)$  и  $(T_0 + S_2, \beta_{\max}/2)$ , определяют ширину спектра на уровне полумаксимумов ( $\beta_{\max}/2$ ). Полученные точки соединяем с вершиной спектра. В области длинных периодов по отношению к  $T_0$  от уровня 0.5 проводим прямую,

спадающую по степени  $1/3$ . На уровне  $\beta = 1$  на этой прямой мы получаем следующую точку длиннопериодной ветви спектра с координатами  $(T_0 + 2S_2, 1)$ . Последняя точка имеет координаты  $(T_0 + 3S_2, 1)$ .



**Рисунок 9.** Схема построения спектра реакции в скоростях.

Следует отметить, что в реальных спектрах и по теоретическим представлениям в длиннопериодной части спектр должен спадать пропорционально периоду колебаний. Эта часть спектра является областью смещений. Для нашей выборки точка излома спектра не достигается вследствие недостатка данных.

На короткопериодной ветви спектра строим точку, соответствующую преобладающему периоду ускорения, с абсциссой  $(T_0 / 2.7)$ . От этой точки проводим прямую, спадающую по степени 2.5, до предварительно заданного уровня  $\beta_k$ . Соединяя полученные точки отрезками прямых, получаем искомый спектр скорости.

Данная методика позволяет построить спектр реакции в скоростях с заранее выбранным доверительным уровнем. Для этого необходимо, как и в случае спектра реакции ускорений, вместо ожидаемого периода задаться интервалом, в который с заданным уровнем доверия попадет преобладающий период. При необходимости могут быть построены отдельно спектры реакции для двух горизонтальных компонент и вертикальной компоненты, а также рассчитаны спектры реакции с различным демпфированием.

Применение методики показано на примере построения расчетного (67%-ный доверительный интервал для частотного состава) спектра реакции скорости для землетрясения Лонг Валли, 27.05.1980 г. ( $t_0 = 14^{\text{ч}}-50^{\text{мин}}$ ), на станции Лонг Валли Дам.

В работе рассмотрен вопрос создания банка региональных синтетических акселерограмм для нужд проектировщиков. Очевидно, что характеристики региональных спектров и акселерограмм определяются магнитудой события, механизмом очага, расстоянием до очага и грунтовыми условиями. Для каждой зоны ВОЗ эти параметры различны. Если же таких зон несколько (обозначим их количество  $m$ ), то следует рассматривать совокупность  $m$  различных воздействий, включая рассеянную сейсмичность. Параметру расстояния в регионе будет соответствовать множество  $n$  различных акселерограмм, где  $n$  – количество интервалов расстояний, на которых значимо изменяется уровень ускорений. Если обозначить количество градаций при СМР  $l$ , то общее количество акселерограмм, характерных для региона, определяется произведением  $m \times n \times l$ . Минимальное

количество грунтовых условий согласно СП14.13330.2018 в нашей стране 4, но намечается тенденция к их увеличению, как в зарубежных нормах. Не стоит забывать и о резонансных свойствах грунтов, учет которых в локальном спектре производится при работах по СМР. Поскольку точность оценок сейсмической интенсивности не хуже 0.5 балла, количество акселерограмм придется увеличить еще вдвое.

Для другой площадки необходимо проведение аналогичных вычислений. Иными словами, для каждой площадки необходимо провести детальное сейсмическое районирование (ДСР) и СМР.

С другой стороны, акселерограмма должна создаваться под построенный спектр с учетом продолжительности  $\tau$ . Сам же спектр можно построить, определив его основные параметры  $T_0$ ,  $S$ ,  $\beta$ , а также уровень  $PGA$ . Последние две величины можно считать фиксированными и использовать их среднемировые значения, либо определить региональные при наличии достаточного количества данных в регионе. Кроме того, значение  $\beta$  можно принять, исходя из каких-либо дополнительных соображений, например, руководствуясь строительными нормами. Тогда спектр целиком будет определяться значением преобладающего периода колебаний. В то же время само это значение зависит от магнитуды события  $M$  и расстояния от очага до точки наблюдения  $R$  (см. главы 3 и 4). Очевидно, что одно и то же значение периода можно получить при различных комбинациях  $M$  и  $R$ .

Но тогда можно банк акселерограмм организовать по параметру  $T_0$  с тем, чтобы и подбирать сами акселерограммы по значению  $T_0$  и прогнозной величине  $\tau$ . При этом и диапазон  $T_0$ , и диапазон  $\tau$  можно разбить на интервалы, соответствующие точности их определения. Такая градация упрощает задание воздействий, но заметно увеличивает погрешность оценок. Однако эта методика создания банка не учитывает резонансные явления, наличие которых искажает форму спектра.

При учете типа подвижки в очаге другими региональными особенностями можно пренебречь. Масштабирование же уровня ускорений проблемы не составляет.

Очевидно, что чем больше по площади исследуемый регион, тем большее количество акселерограмм должен содержать банк акселерограмм. Отсюда и основная трудность его создания – многочисленность вариаций параметров сейсмических воздействий и их комбинаций. Кроме того, использование акселерограмм такого банка должно проходить без потери точности прогнозных оценок, т.е. с учетом, прежде всего, локальных особенностей.

Учет региональных особенностей становится возможным лишь при проведении полевых работ на площадке и в окрестностях площадки строительства: сейсмотектонических, сейсмологических и т.д. – работ по ДСР.

#### **Выводы по пятой главе:**

1. описан эмпирический метод прогнозирования ожидаемых параметров сейсмического движения грунта;
2. предложен метод задания ожидаемого спектра реакции в ускорениях;
3. впервые предложен метод задания ожидаемого спектра реакции в скоростях;
4. рассмотрены факторы, влияющие на региональные особенности сейсмических воздействий;
5. разработаны принципы создания банка региональных акселерограмм. Основная трудность – многочисленность вариаций параметров сейсмических воздействий и их комбинаций. Учет региональных особенностей возможен при непосредственном проведении работ по детальному сейсмическому районированию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены количественные характеристики колебаний грунта, с помощью которых может быть описан сейсмический эффект землетрясения. При выполнении исследований по теме диссертации автором поставлены и решены следующие основные задачи.

Рассмотрены процессы формирования и распространения сейсмических колебаний в эпицентральной зоне землетрясений. Изучено затухание пиковых ускорений грунта (*PGA*) с применением нормированных по магнитуде расстояний, и построена единая для всех магнитуд кривая затухания *PGA*. Подтверждено наличие трех зон с различными законами затухания амплитуд. Для первой зоны, в которой амплитуда растет с расстоянием, диссертантом предложено эмпирическое уравнение затухания. Эта зона выделена из ближней зоны и расположена в непосредственной близости от разлома. Ее предложено назвать разломной. Во второй (ближней) зоне амплитуда затухает слабее первой степени вследствие “подпитки” волны сейсмической энергией, выделяемой средой. Автором предложено назвать совокупность разломной и ближней зон очаговой зоной. В третьей зоне затухание резко возрастает, поскольку выделение энергии прекращается, а декремент поглощения очень высок и, согласно законам механики, определяется уровнем колебаний.

Для дальней зоны диссертантом предложена эмпирическая зависимость затухания ускорений в функции магнитуды.

Показано, что установленные закономерности распространения волнового поля сейсмических колебаний не зависят от региональных особенностей и характерны для любых регионов мира.

Изучены соотношения амплитуд сейсмических колебаний на различных компонентах в зависимости от уровня колебаний, магнитуды, расстояния, типа грунта и типа подвижки в очаге. Установлено, что определяющим фактором является уровень колебаний.

Рассмотрены особенности вертикальной компоненты колебаний, предложено эмпирическое выражение для оценки ее уровня в зависимости от уровня максимальной горизонтальной компоненты.

Впервые установлены зависимости продолжительности колебаний в ускорениях от различных факторов.

Уточнено уравнение для оценки преобладающих периодов колебаний.

В спектральной области изучены внутренние взаимосвязи между отдельными параметрами спектра реакции в ускорениях, а также влияние различных факторов на формирование спектра.

Впервые установлены зависимости коэффициента динамического усиления ускорений от различных факторов.

Установлен закон масштабирования амплитуд скоростей.

Впервые установлены особенности затухания скоростей в разломной, ближней и дальней зонах.

Изучены соотношения пиковых амплитуд скоростей *PGV* на различных компонентах в зависимости от уровня колебаний, магнитуды, расстояния, типа грунта и механизма очага.

Разработаны корреляционные соотношения для прогноза параметров сейсмических колебаний в скоростях.

Впервые установлена средняя форма спектра реакции в скоростях для отдельного землетрясения, и исследованы его основные параметры (найденны их средние значения и соответствующие стандартные отклонения).

В качестве практической реализации полученных результатов предложены методики задания ожидаемых спектров реакции в ускорениях и в скоростях. Основой их служат средние оценки параметров спектра – уровня колебаний, преобладающего периода, ширины спектра, которые задаются на основании эмпирических соотношений, полученных для исследуемого района, или среднемировых в зависимости от имеющегося материала.

Несмотря на то, что изучение нелинейных явлений не входило в круг вопросов, рассматривавшихся в диссертационной работе, в ходе проведенных исследований были обнаружены отдельные проявления нелинейности. Так, установлено, что существуют предельные уровни колебаний, выше которых от амплитуды колебаний зависит не только декремент поглощения, но и соотношение уровней вертикальной и горизонтальной компонент, а также коэффициент динамического усиления. Неучет нелинейных явлений отразился в увеличении стандартных отклонений установленных корреляционных соотношений.

Рассмотрены проблемы учета региональных особенностей сейсмических воздействий и создания банка региональных синтетических акселерограмм, применяемых для проектирования и строительства, которые в последнее время все чаще поднимаются в среде специалистов, связанных с сейсмостойким строительством. Сделан вывод, что проведение работ по детальному сейсмическому районированию с целью оценки параметров сейсмического движения грунта на конкретной площадке строительства – эффективный метод, позволяющий наиболее полно учесть региональную специфику сейсмических колебаний.

В результате проведенных исследований развиты научные основы важного направления в сейсмологии – оценки сейсмической опасности в количественных характеристиках сейсмического движения грунта. В этой области получены следующие **наиболее важные результаты**:

1. уточнены оценки основных параметров сейсмического движения грунта в ускорениях;
2. установлены закономерности формирования и распространения сейсмического движения грунта в скоростях, позволяющие оценить пиковые амплитуды скоростей, частотный состав и продолжительность колебаний, коэффициент динамического усиления спектра реакции;
3. разработаны методики задания сейсмических воздействий в ускорениях и скоростях.

Установленные закономерности могут быть использованы при задании сейсмических воздействий для целей проектирования зданий и сооружений, а также при решении фундаментальных задач в области физики очага землетрясения.

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют наметить перспективы будущих исследований. Прежде всего, необходимо дальнейшее пополнение имеющегося набора эмпирических данных по сильным движениям грунта. Развитие сейсмологии на современном этапе делает эту задачу вполне выполнимой. Причем, одним из важнейших обязательных требований к новым данным является не только наличие цифровой записи, но и максимально полная документированность параметров землетрясений и среды в точке регистрации. К ним можно отнести: наличие определения магнитуды, глубины очага, кратчайшего

расстояния до плоскости разрыва, уверенного определения механизма очага, описание грунтового разреза в пункте регистрации до 30 м. По мере накопления такого материала, его дальнейшей обработки следует рассмотреть следующие задачи:

пересмотреть и уточнить корреляционные уравнения для преобладающих периодов колебаний ускорений и скоростей;

при исследованиях зависимостей от грунтов ввести непрерывную градацию грунтов по скоростям в верхнем 30-метровом слое;

уточнить уравнения затухания для механизмов очага типа поддвигов;

исследовать характеристики смещений сейсмических колебаний, для чего провести массовые расчеты спектров смещений, установить среднюю форму спектра реакции смещений и рассмотреть взаимосвязи отдельных параметров спектров; исследовать влияние различных факторов очага и среды на формирование спектра реакции смещений; разработать системы корреляционных уравнений для прогноза характеристик смещений. Окончательный этап - создание методики прогноза ожидаемых количественных параметров сейсмических колебаний в смещениях, включая методику построения ожидаемого спектра реакции смещений, для практического использования.

Решение указанных задач особенно после внедрения в практику сейсмостойкого строительства будет способствовать более успешному решению важной проблемы - повышению сейсмостойкости возводимых сооружений с одновременным снижением стоимости проводимых антисейсмических мероприятий.

В области физики очага землетрясения сопоставление полученных результатов с оценками параметров, описывающих сейсмический эффект, рассчитанными с использованием различных теоретических соотношений, будет способствовать построению адекватных моделей очагов землетрясений и процессов, в них происходящих.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Аптекман Ж.Я., **Эртелева О.О.** Типы афтершоков и движения в ближней зоне Спитакского землетрясения // Известия РАН. Физика Земли. - 1993. - №4. - С.67 – 73.
2. **Эртелева О.О.** Ближняя зона Нефтегорского землетрясения 27(28).05.95 г. // Известия РАН. Физика Земли. - 1998. - №9. - С. 62 – 69.
3. Аптекман Ж.Я., **Эртелева О.О.** Афтершоковая последовательность Рачинского землетрясения 29.04.1991 г.: особенности до и после сильнейшего повторного толчка 15.06.1991 г. // Физика Земли. - 1999. - №6. - С. 15 – 21.
4. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Метод задания регионального спектра реакции для строительного проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2001. - №4. - С. 4 - 7.
5. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // Физика Земли. - 2002. - № 7. - С. 39 – 45.
6. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2005. - № 1. - С. 43 – 45.

7. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Задание спектров и соответствующих синтетических акселерограмм // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2005. - № 5. - С. 67 – 71.
8. Махдавиан А., Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Параметры сильных движений грунта в сейсмически активных зонах Ирана // Физика Земли. - 2005. - № 2. - С. 23 - 29.
9. Алешин А.С., Капустян Н.К., Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.**, Рогожин Е.А. Отзыв о проекте СНИП “Строительство в сейсмических районах” (Институт физики Земли (ИФЗ) им. О.Ю. Шмидта РАН)// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2008. - № 2. - С. 26 – 28.
10. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Параметры спектров реакции // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2008. - № 5. - С. 23 – 25.
11. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.**, Мокрушина Н.Г. Категория сейсмических шкал семейства Меркалли // Вулканология и сейсмология. - 2008. - № 3. - С. 74 – 78.
12. Аптикаев Ф.Ф., Воронков О.К., Моторин Г.А., Никонов А.А., **Эртелева О.О.** Оценка сейсмических воздействий при строительстве особо ответственных объектов в Санкт-Петербурге // Инженерные изыскания. – 2011. - № 10. - С. 4 – 18.
13. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.**, Бержинский Ю.А., Клячко М.А., Шестоперов Г.С., Стром А.Л. Шкала интенсивности землетрясений. Проект новой Российской сейсмической шкалы. Национальный стандарт Российской Федерации. Часть I // Инженерные изыскания. - 2011. - № 10. - С. 62 – 71.
14. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.**, Бержинский Ю.А., Клячко М.А., Шестоперов Г.С., Стром А.Л. Шкала интенсивности землетрясений. Проект новой Российской сейсмической шкалы. Национальный стандарт Российской Федерации. Часть II // Инженерные изыскания. - 2011. - № 11. - С. 86 – 92.
15. **Эртелева О.О.** Прогноз уровня вертикальной компоненты// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2011. - № 1. - С. 52 – 55.
16. **Эртелева О.О.**, Аптикаев Ф.Ф., Баруа Саураб, Баруа Сантану, Бисвас Р., Калита А., Деб С., Кайал Дж.Р. Прогноз параметров сильных движений грунта на плато Шиллонг и прилегающих территориях (Северо-Восточная Индия) // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2011. – Т. 38, вып. 3. - С. 5 – 21.
17. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Методы прогноза параметров сейсмического движения грунта, включая построение локального спектра и синтетической акселерограммы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2012. – № 2. - С. 15 - 19.
18. **Эртелева О.О.**, Аптикаев Ф.Ф. Что такое детальное сейсмическое районирование? // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. - № 4. С. 63 - 68.
19. **Эртелева О.О.** Оценка ожидаемых сейсмических воздействий от удаленных землетрясений// Инженерные изыскания. 2013. - № 7. С. 58 – 67.
20. **Olga Erteleva**, Felix Aptikaev, Saurabh Baruah, Santanu Baruah, Sajal K. Deb, J.R.Kayal Seismic treatment for a maximal credible earthquake in Guwahati city area of northeast India region // Natural Hazards. - 2014. - V. 70, № 1. - Pp. 733 – 753. - DOI: 10.1007/s11069-013-0843-3
21. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** “Большая” сейсмология вводит инженеров в заблуждение// Инженерные изыскания. - 2014. - № 2/2014. - С. 42 – 46.
22. **Эртелева О.О.** Спектры реакции в скоростях: оценки параметров и формы // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2015. - Т.42, №4. - С. 5 – 14.

23. **Эртелева О.О.**, Аптикаев Ф.Ф. Создание банка региональных синтетических акселерограмм // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2016. - Т. 43, № 2. - С. 30 – 36.
24. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Российская сейсмическая шкала нового поколения // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2016. - Т. 43, № 2. - С. 37 – 46.
25. **Эртелева О.О.**, Аптикаев Ф.Ф. Применение теории размерностей и подобия при задании сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2018. - Т. 45, №1. - С. 59 – 72. - DOI: 10.21455/VIS2018.1-6
26. Аптикаев Ф.Ф., **Эртелева О.О.** Стоячие волны в эпицентральных областях землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2018. - Т. 45, № 3. - С. 45 – 56. - DOI: 10.21455/VIS2018.3-4
27. **Эртелева О.О.**, Сидорин А.Я., Соколова Е.Ю., Лукк А.А., Никонов А.А., Аптикаев Ф.Ф., Шварев С.В. Методика оценки сейсмической опасности стабильных континентальных районов по комплексу палеосейсмологических и геофизических данных // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2018. - Т. 45, № 4. - С. 69 – 94. - DOI: 10.21455/VIS2018.4-5
28. **Эртелева О.О.**, Аптикаев Ф.Ф., Сомала С.Н., Кайал Дж.Р., Рагхучаран М.Ч. Закономерности затухания ускорений в Западных Гималаях // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2019. - Т. 46, № 2. - С. 74 – 86. - DOI: 10.21455/VIS2019.2-7
29. Аптикаев Ф.Ф., Алешин А.С., Никонов А.А., Погребченко В.В., **Эртелева О.О.**, Ассиновская Б.А. Макросейсмические проявления Калининградского землетрясения 2004 г. // Геориск. – 2019.- Том XIII, № 3. – С. 40 – 59. – <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-40-59>

Подписано в печать 2020 г.  
Формат 64×84/16. Объем 2,0 усл. печ. л.  
Тираж 100 шт. Заказ №

Отпечатано в ИАЦ ИФЗ РАН  
123242 г.Москва, Б.Грузинская ул., д.10, стр. 1  
Тел./факс: (499) 254 90 88. E-mail: [serg@tigra-press.ru](mailto:serg@tigra-press.ru)