

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. ШМИДТА  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

*Эртелева*

**Эртелева Ольга Олеговна**

**ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ  
В ЭПИЦЕНТРАЛЬНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

**(СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 25.00.10 – ГЕОФИЗИКА, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ  
МЕТОДЫ ПОИСКОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ)**

**Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора физико-математических  
наук**

**Москва**

**2019**

## СОДЕРЖАНИЕ

	Введение.....	6
1	Аналитический обзор литературных данных.....	17
1.1	Современные представления о ближней зоне землетрясения.....	17
1.2	Ускорения сейсмических колебаний.....	21
1.2.1	Закон затухания пиковых ускорений грунта.....	21
1.2.2	Отношение уровней горизонтальных компонент.....	24
1.2.3	Уровень вертикальной компоненты.....	25
1.2.4	Преобладающий период колебаний ускорений грунта.....	27
1.2.5	Частотный состав колебаний.....	31
1.2.6	Продолжительность сейсмических колебаний.....	34
1.2.7	Спектральные амплитуды сейсмических колебаний.....	39
1.2.8	Коэффициент динамического усиления $\beta$ .....	40
1.3	Скорости сейсмических колебаний.....	42
1.3.1	Затухание пиковых скоростей грунта.....	45
1.3.2	Спектры скоростей колебаний грунта.....	50
1.3.3	Продолжительность сейсмических колебаний в скоростях.....	60
1.4	Выводы.....	61
2	Методика исследований и исходные данные.....	64
2.1	Классификация методов прогноза параметров сейсмических колебаний.....	64
2.1.1	Использование инструментальной шкалы сейсмической интенсивности.....	65
2.1.2	Использование реальных записей, полученных непосредственно на исследуемой площадке или в сходных сейсмогеологических условиях.....	67
2.1.3	Расчеты с использованием моделей очага землетрясения.....	69
2.1.4	Статистические оценки параметров колебаний.....	72

2.2	Исследуемые параметры сейсмического движения грунта.....	74
2.2.1	Параметризация сейсмических записей.....	75
2.2.2	Параметризация спектра реакции.....	77
2.3	Использованные данные и методика их обработки.....	83
2.4	Выводы.....	93
3	Пиковые ускорения грунта.....	94
3.1	Затухание пиковых амплитуд ускорений грунта.....	94
3.2	Соотношение пиковых амплитуд различных компонент ускорений грунта.....	122
3.2.1	Отношение амплитуд ускорений грунта на горизонтальных компонентах.....	122
3.2.2	Зависимости отношения амплитуд ускорений грунта на вертикальной и горизонтальной компонентах от различных факторов.....	125
3.2.2.1	Влияние уровня колебаний грунта.....	125
3.2.2.2	Влияние расстояния и магнитуды.....	126
3.2.2.3	Влияние типа грунта.....	128
3.2.2.4	Влияние механизма очага.....	131
3.3	Продолжительность колебаний в ускорениях.....	135
3.4	Спектры ускорений.....	138
3.4.1	Преобладающий период.....	139
3.4.2	Коэффициент динамического усиления .....	140
3.4.2.1	Значения коэффициентов динамического усиления для двух горизонтальных компонент.....	141
3.4.2.2	Зависимость коэффициента динамического усиления от типа подвижки в очаге.....	144
3.4.2.3	Зависимость коэффициента динамического усиления от категории грунта .....	147
3.4.2.4	Зависимость коэффициента динамического усиления от пиковой амплитуды ускорений.....	

3.4.2.5	Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний.....	149
3.4.2.6	Зависимость коэффициента динамического усиления от преобладающего периода .....	151
3.4.2.7	Зависимость коэффициента динамического усиления от ширины спектра.....	152
3.4.2.8	Зависимость коэффициента динамического усиления от количества циклов колебаний.....	153
3.5	Выводы.....	154
4	Пиковые скорости грунта.....	156
4.1	Закон масштабирования кривых затухания пиковых амплитуд скоростей.....	156
4.2	Закон затухания пиковых амплитуд скоростей.....	160
4.3	Соотношение пиковых амплитуд скоростей на различных компонентах.....	169
4.3.1	Соотношение пиковых амплитуд скоростей на горизонтальных компонентах.....	169
4.3.2	Уровень вертикальной компоненты.....	174
4.4	Продолжительность колебаний скорости.....	181
4.5	Спектры реакции в скоростях.....	182
4.5.1	Асимметрия и крутизна склонов.....	183
4.5.2	Логарифмическая ширина.....	188
4.5.3	Коэффициент динамического усиления.....	189
4.5.3.1	Коэффициент динамического усиления второй горизонтальной компоненты.....	190
4.5.3.2	Зависимость коэффициента динамического усиления от пиковой амплитуды скорости колебаний.....	191
4.5.3.3	Зависимость коэффициента динамического усиления от преобладающего периода.....	193
4.5.3.4	Зависимость коэффициента динамического усиления от	

ширины спектра.....	195
4.5.3.5 Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний.....	196
4.5.3.6 Зависимость коэффициента динамического усиления от количества циклов.....	197
4.5.4 Преобладающий период спектра реакции в скоростях.....	198
4.5.4.1 Зависимость преобладающего периода от магнитуды и расстояния.....	198
4.5.4.2 Соотношение преобладающих периодов горизонтальных компонент.....	201
4.5.4.3 Преобладающий период скорости вертикальной компоненты.....	202
4.5.5 Средняя форма спектра реакции в скоростях.....	203
4.6 Выводы.....	205
5 Прогноз параметров сейсмического движения грунта.....	206
5.1 Эмпирический метод прогнозирования параметров сейсмического движения грунта.....	206
5.2 Построение спектров реакции по эмпирическим данным.....	207
5.2.1 Локальные спектры ускорений.....	209
5.2.2 Локальные спектры скоростей.....	213
5.3 Банк региональных синтетических акселерограмм.....	217
5.3.1 Региональные особенности основных параметров сильных движений грунта.....	218
5.3.2 Подбор синтетических акселерограмм по параметрам сейсмических воздействий.....	220
5.4 Выводы.....	222
Заключение.....	223
Список использованных источников.....	228

## ВВЕДЕНИЕ

Диссертационная работа является итогом исследований автора, посвященных сильным движениям в эпицентральных областях землетрясений и прогнозу количественных параметров сильных движений грунта, а также работ по оценке сейсмической опасности и заданию сейсмических воздействий при проектировании строительных объектов повышенной ответственности.

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. Большой вклад в развитие этого направления исследований внесли К. Шольц (Scholz С.Н.), К. Моги (Mogi К.), Г.А.Соболев, И.П.Добровольский, А.Д.Завьялов, В.И.Мячкин, В.И.Кейлис-Борок, С.А.Федотов, А.А.Любушин, С.Ц.Акопян и др. 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 характеристиках 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 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 (оценка резонансных свойств грунтов и приращений сейсмической интенсивности на площадке) проводится при работах по сейсмическому микрорайонированию. Среди ученых, работавших и работающих в области оценки сейсмической опасности, следует упомянуть В.Н.Крестникова, В.П.Солоненко, В.И.Уломова, Ю.К.Щукина, А.А.Никонова, В.Г.Трифорова, Е.А.Рогожина, Н.В.Шебалина, С.С.Арефьева, А.И.Лутикова, Р.Э.Татевосяна, А.С.Алешина, А.И.Савича, Дж.Меркалли, К.Ирикуру и многих других.

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, зарегистрированных в изучаемом районе землетрясений. В развитие этого направления исследований большой вклад внесли С.В.Медведев, Ю.В.Ризниченко, И.Л.Нерсесов, В.И.Бунэ, А.Г.Назаров, И.В.Ананьин, Н.В.Шебалин, А.Д.Гвишиани и др., а за рубежом - Б.Гутенберга и

Ч.Рихтер, Р.Дж.Брейзи и Дж.Р.Мерфи, Р.Ньюмен, Л.Дж.О'Брайен и многие другие.

Если же речь заходит о динамических расчетах, которые в последнее время приобретают все большее распространение, то необходимы еще и оценки воздействий в инженерных характеристиках сейсмических колебаний – ускорениях, скоростях, смещениях и др. Прогноз их ведется как с использованием различных теоретических закономерностей, так и по результатам статистической обработки инструментальных записей. А.В.Введенская, Б.В.Костров, А.А.Гусев, А.Г.Москвина, В.М.Грайзер, О.Д.Воевода, К.Аки, Дж. Брюн, Д.Бур, К.В.Кемпбелл, Р.Сато, П.Спудих, Л.Фрезер, Н.А.Хаскелл, Ш.Дас – нельзя не упомянуть этих исследователей, внесших огромный вклад в развитие теории и практики математического моделирования процессов в очагах землетрясений и распространения сейсмических волн.

Прогноз воздействий с использованием инструментальных данных развивался и сейсмологами, и инженерами-строителями. Несомненно, стоит упомянуть имена М.А.Садовского, С.В.Медведева, С.С.Дарбиняна, Д.Н.Рустановича, Е.Г.Бугаева, Ю.К.Чернова, В.В.Штейнберга, С.В.Полякова, Ю.П.Назарова и многих других, а из зарубежных исследователей – Н.Н.Амбрасейса, Д.М.Бура, В.Б.Джойнера, Б.Болта, Н.К.Донована, К.В.Кемпбелла, Р.Неймана, К.Роджана, М.Д.Трифунаса, М.Тодоровской, А.Ф.Эспиносы, А.К.Чопры, В.Лии и других. Основопологающую роль в таких 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 внимание при этом требует к себе ближняя зона землетрясений, так как именно в ней наблюдаются причиняющие наибольший 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 и 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. Работа посвящена решению проблемы повышения точности прогноза количественных характеристик сейсмических воздействий.

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, для каждой из которых установлены эмпирические формулы, описывающие уровень амплитуды ускорения грунта в зависимости от магнитуды землетрясения, типа подвижки в очаге 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 затухания существенно различны. Последний факт по скоростям колебаний отмечен впервые.

Обнаружена и описана зависимость соотношения уровней амплитуд скоростей на вертикальной и горизонтальной компоненте от различных факторов.

Впервые установлена средняя форма спектров 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. Упомянутые соотношения установлены впервые.

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

#### Теоретическое и практическое значение результатов исследований.

Представляемая работа проводилась в рамках ряда направлений, в том числе 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, Нововоронежской АЭС, Ленинградской АЭС, Билибинской АЭС, ПАТЭС (г. Певек) и др.; на площадке строительства железнодорожного вокзала г. Адлера, совмещённой автомобильной и железной дороги Адлер - горноклиматический курорт “Альпика-сервис”; трубопроводной системы Восточная Сибирь – Тихий океан (ВСТО); трассы магистрального газопровода “Сахалин-Хабаровск-Владивосток”; при реконструкции магистрального газопровода и КЛС (кабельной линии связи) “Кази-Магомед - Моздок”, при реконструкции ГИС Ново-Филя; платформы Аркутун-Даги (о. Сахалин); при проектировании ряда мостов на территории РФ, в том числе транспортного перехода через Керченский пролив и объектов его инфраструктуры, мостового перехода через пролив Босфор Восточный; вантового моста через р. Лену (г. Якутск); при проектировании сейсмостойких конструкций мостов и путепроводов на территории Туркменистана; ряда гидротехнических сооружений, например, Рогунской ГЭС (Таджикистан), Ирганайской ГЭС, Эзминской ГЭС, Братской ГЭС и др.; на площадках Краснодарской ТЭЦ, Ставропольской ГРЭС; на площадке Афипского нефтеперерабатывающего завода; на площадке строительства причала с обустройством сезонного морского пункта пропуска через государственную границу РФ на о. Беринга (Командорские острова); при оценке воздействий в г. Свободный (Амурская область),

г. Калининград, г. Москва; на площадках МТРЦ Сити-Парк, г. Сочи, на площадке строительства конференц-центра для проведения саммита АТЭС-2012 (о. Русский) в составе подпрограммы “Развитие г. Владивостока как центра международного сотрудничества в Азиатско-Тихоокеанском регионе”; аэропортов в г. Симферополь, г. Саратов; для некоторых уникальных объектов, например, Лахта-центра в г. Санкт-Петербурге; при оценке сейсмических воздействий для объектов гражданского строительства в г. Сочи, г. Новороссийске, г. Геленджике, г. Краснодаре, г. Улан-Удэ и других.

Некоторые результаты автора нашли свое отражение в нормативных документах, таких как Свод правил 286.1325800.2016 “Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования” (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства России от 16.12.2016 за № 980/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г.), ГОСТ Р 57546-2017 “Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности” (утв. Приказом Федерального агентства по техническому урегулированию и метрологии от 19 июля 2017 г. за № 721-ст; введен в действие 1 сентября 2017 г.) и Свод правил 408.1325800.2018 “Детальное сейсмическое районирование и сейсмомикрорайонирование для территориального планирования” (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства России от 28.12.2018 г. за № 873/пр и введен в действие с 27 июня 2019 г.), Межгосударственный стандарт ГОСТ 34511-2018 “Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности” (принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 20 декабря 2018 г. № 114-П) и приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 апреля 2019 г. № 140-ст введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2019 г.).

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. Высокая степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением в ходе исследований представительным объемом 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 сравнением полученных результатов расчетов с эмпирическими данными на всех этапах исследования.

Отдельные разделы работы докладывались на Международной конференции по инженерной сейсмологии “ЕЕ-21С” (Скопье - Охрид, Сербия, 2005), Симпозиуме с международным участием “Предотвращение/смягчение природных опасностей сегодня” (Бухарест, Румыния, 2005), 1-ой Европейской конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмологии (Женева, Швейцария, 2006), на XXIV Генеральной Ассамблее Международного союза по геодезии и геофизике (Перуджа, Италия, 2007), на XIV Всемирной конференции по инженерной сейсмологии (Пекин, КНР, 2008), на Международной конференции по сейсмостойкому строительству “Землетрясение Банья-Лука – 40 лет инженерного опыта” (Банья-Лука, Республика Српска, Босния и Герцеговина, 2009), V и VI Общероссийской конференции “Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации” (Москва, 2009, 2010), Чэпмановская конференция (Хайдарабад, Индия, 2010), VI и VII Савиновских чтениях (Санкт-Петербург, 2010, 2014), XVI Европейской конференции по инженерной сейсмологии (Скопье-Охрид, 2010), 8-ой (Ханой, Вьетнам, 2010) и 9-ой (Улан-Батор, Монголия, 2012) Генеральных Ассамблеях Азиатской

сейсмологической комиссии, Международном семинаре по современным достижениям в науках о Земле (Дханбад, Индия, 2011), Всемирном форуме Геокатаклизм - 2011 (Стамбул, Турция, 2011), 2-ой (Пхукет, Таиланд, 2013) и 3-ей (Сингапур, Сингапур, 2014) ежегодных конференциях по геологии и наукам о Земле Всемирного научного и технического форума, XIX и XXI научно-практических конференциях с международным участием “Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы” (Москва, 2014; 2018), II Международной конференции молодых ученых по современным задачам геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства (Ереван – Гюмри – Цахкадзор, Армения, 2015), Евразийских форумах SEISMO-2016 (Москва, 2016) и SEISMO-2017 (Москва, 2017), 48-ом Скандинавском сейсмологическом семинаре (Хельсинки, Финляндия, 2017), 10-й научно-практической конференции по проблемам снижения природных опасностей и рисков “Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата”, ГЕОРИСК – 2018 (Москва, 2018), Общероссийской научно-практической конференции “Изучение опасных природных процессов и явлений при инженерных изысканиях” (Москва, 2019), на VI, XI и XIII Российских Национальных Конференциях по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) (Сочи, 2005; 2015; Санкт-Петербург, 2019), 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 представленные в диссертации выкладки, результаты расчётов получены автором лично. Автором 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.Никонова, 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).

## Глава 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

### 1.1 Современные представления о ближней зоне землетрясения

Проведение разнообразных антисейсмических мероприятий, учет ожидаемых сейсмических воздействий, выраженных в параметрах сейсмического движения грунта, при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений способствует снижению ущерба, наносимого землетрясением. Инструментальные данные, полученные в эпицентральной области землетрясения, несут максимальное количество информации об очаге землетрясения и процессах, в нем происходящих. Слабым местом в этом процессе по-прежнему является задание сейсмических воздействий. В последние десятилетия почти во всех странах, имеющих сейсмически активные районы, резко увеличилось количество станций сильных движений. В настоящее время мировая библиотека сейсмических воздействий насчитывает тысячи записей сильных движений. Статистически представительный материал позволяет с достаточной точностью оценивать ожидаемые параметры сейсмического движения грунта. Однако строительные нормы вследствие инертности до сих пор не учитывают влияние на сейсмические воздействия таких факторов, как магнитуда землетрясения, расстояние объекта от очага, тип подвижки по разлому, а из всех параметров колебаний принимают во внимание только амплитуду ускорения. Рассмотрим достижения в области инженерной сейсмологии, не учитываемые пока в сейсмостойком строительстве.

Имеющиеся в распоряжении исследователей данные о сильных движениях грунта не только не подтверждают, но и опровергают многие представления об очаге землетрясения, и процессах в нем протекающих. Оказалось, что корреляционные соотношения, связывающие параметры сейсмических колебаний с параметрами среды и очага, полученные на телесеизмических расстояниях, неприменимы в эпицентральных зонах. Например, установлено, что максимальные амплитуды ускорения проявляются не на самом разломе, а на некотором расстоянии от него. Этот факт отмечается многими исследователями

[Составление..., 1996; Aptikaev, Erteleva, 2007; Graizer, Kalkan, 2007; 2009; 2011]. Однако часто рост амплитуды с расстоянием игнорируется или объясняется ошибками измерений. Например, в работе [Skarlatoudis et al., 2013] зона с повышением уровня колебаний при удалении от поверхности разлома выделяется вполне надежно, но авторы не предлагают никакого объяснения наблюдаемого явления. А выявленное при анализе Газлийских землетрясений спадание амплитуд вблизи разлома [Газлийские землетрясения..., 1982; 1986] Ю.К.Чернов объяснил лишь неверными оценками расстояний.

Имеющиеся эмпирические данные также говорят и о том, что на поверхности разрыва амплитуда ускорения в среднем постоянна и не зависит от магнитуды землетрясения. В работе [Садовский, Писаренко, Штейнберг, 1983] было показано, что магнитуда землетрясения связана не с концентрацией потенциальной энергии в очаге, а с объемом этого очага. Разумеется, в очаговой зоне накопление деформаций должно иметь предел, иначе и землетрясений бы не было. Постоянство амплитуды ускорений вблизи поверхности разлома было показано в целом ряде работ [Hanks, Johnson, 1976; Herrman, 1977; Trifunac, 1976; Espinosa, 1980; Составление..., 1996; Bureau, 1981; Campbell, 1981; Bommer, Martínez-Pereira, 2000; Yamada, Olsen, Heaton, 2009; Aptikaev, 2009]. Однако многие специалисты и сегодня считают, поскольку магнитуда есть логарифм амплитуды, вблизи разлома с ростом магнитуды должна расти и амплитуда [Togo et al., 1997; Margaritis et al., 2002; Soghrat, Ziyaeifar, 2017; Sedaghati, Pezeshk, 2017; García-Soto, Jaimes, 2017 и др.]. Двумерная модель очага землетрясения по Буру также предполагает непрерывный рост амплитуды с магнитудой [Boore, 1983].

Для сдвигов диапазон максимальных амплитуд по данным этих работ составляет  $500 - 550 \text{ см/с}^2$ , а для зоны субдукции по данным работы [Skarlatoudis et al., 2013] - около  $700 \text{ см/с}^2$ . Согласно современным инструментальным шкалам сейсмической интенсивности [Wald et al., 1999; ГОСТ Р 57546-2017] таким ускорениям соответствует интенсивность не выше 9 баллов. В работе [Bommer, Martínez-Pereira, 2000] показано, что и при 9 баллах и 11 баллах ускорения одинаковы. Отсюда можно сделать вывод, что при интенсивностях выше 9 баллов

ускорения не характеризуют сейсмический эффект. Необходимо отметить, что авторы этой работы оперируют наиболее вероятными значениями ускорений. Если же принять в учет стандартное отклонение для ускорений вблизи разлома, которое по ГОСТ Р 57546-2017 составляет 0.17 единиц десятичного логарифма, то становится очевидным, что ускорения могут достигать  $3g$  и вызвать 10 - балльное землетрясение с вероятностью менее одного процента. Подвижка по разлому начинается при ускорениях примерно вдвое меньше максимальных.

Из эмпирических данных [Составление..., 1996; Аптикаев, 2009] следует, что в инженерном диапазоне амплитуда ускорений масштабируется не повышением уровня амплитуд, а сдвигом значений ускорений вдоль оси расстояний  $R$  по закону  $R \sim 0.33M_S$ . Это соотношение соответствует также результатам, полученным ранее в работе [Wells, Coppersmith, 1994].

Своеобразие ближней зоны проявляется и в отношении определения магнитуды землетрясений [Эртелева, Аптикаев, 2018]. Как известно, референц - расстояние, на котором рекомендуется определять магнитуду, выбрано постоянным, не зависящим от силы землетрясения, и равным 100 км. Следовательно, такое определение магнитуды нарушает правила теории размерностей и подобия. Поэтому оно и не применимо в инженерном диапазоне амплитуд, чем и можно объяснить явление насыщения магнитуды, определяемой по амплитудам волн. Тем не менее, у такого определения есть и свои преимущества: флюктуации амплитуд по оси расстояний отражают внутренне строение планеты и наблюдаются на фиксированных расстояниях.

Обнаружено различие амплитуд при фиксированных значениях магнитуды и расстояния в зависимости от типа подвижки по разлому [Аптикаев, Копничев, 1979]. Сейчас это явление не вызывает никаких сомнений [Campbell, 1981; The dynamic..., 1982; Sadigh et al., 1997; Graizer, Kalkan, 2011; Abrahamson, Silva, 1997; Cousins et al., 1999 и др.]. Различие между амплитудами ускорений для сбросов и взбросов оценивается от 10 - 28 % до 100% [Campbell, 1981; Sadigh et al., 1997]. Разница в оценках связана, по нашему мнению, с различиями в рассматриваемых диапазонах расстояний. Неприменимость определения магнитуды вблизи очага

землетрясения существенно затрудняет оценку ожидаемых параметров сейсмических колебаний.

Многими исследователями отмечаются существенные различия параметров сейсмического движения грунта в ближней и дальней зонах. До сих пор четкого определения понятия ближней зоны нет. Авторы работы [Heydari, Mousavi, 2015], анализируя сейсмический эффект землетрясений в ближней и дальней зоне, указывают, что воздействия в ближней зоне существенно отличаются от воздействий в дальней зоне. Но при этом четкого определения границы между ближней и дальней зоны не дают. В литературе встречаются оценки от 10 до 100 км. Последнюю оценку можно найти в работе [Артиков и др., 2018]. В большинстве работ, посвященных изучению очагов землетрясений, под ближней зоной подразумевается область, в пределах которой нельзя пренебречь размерами очага. Однако четкого определения очага тоже не существует. Часто под очагом понимается сам разрыв [Гусев, 1988; Грайзер, Эртелева, 1991; Midorikawa, 1993; Joshi, 2004; Voore, 2005; Павленко, 2009; Смирнов, Вахрина, 2011 и др.]. Понятно, что поверхность не может содержать запасов энергии, оценка которых также является проблематичной.

Некоторые исследователи [Шебалин, 1997; Грайзер, 1984; Арефьев, 2003 и др.] под понятием ближней зоны подразумевают область, охваченную афтершоковым процессом, без определений конкретных численных значений.

В российской литературе количественное определение ближней зоны попытался дать В.В.Штейнберг, у которого эта зона ограничивается радиусом в 25 км от очага землетрясения [Штейнберг, 1985; Штейнберг, Пономарева, 1987]. Стоит отметить, что указанное расстояние приведено для сильных землетрясений с магнитудами  $M > 6.0$ .

В работах Ф.Ф.Аптикаева [Аптикаев, 2012 и др.] сделана попытка определить размеры ближней зоны (в зависимости от магнитуды землетрясения  $M$ ) по степени затухания волн. Действительно, в очаговой области происходит не только затухание энергии, но и ее выделение. Поэтому затухание в очаговой зоне

должно быть заметно слабее, чем за пределами очага. Полученное выражение имеет вид:

$$\lg R_0(\text{км}) = 0.33 M_S - 0.61, \quad (1.1)$$

где расстояния  $R_0$  отсчитываются от ближайшей точки поверхности разлома.

## 1.2 Ускорения сейсмических колебаний

### 1.2.1 Закон затухания пиковых ускорений грунта

Работ, посвященных установлению зависимости амплитуды ускорений грунта от магнитуды и расстояния, известно немало, см., например, [Stewart et al., 2013]. Мы остановимся лишь на тех работах, результаты которых основаны на обработке первичных экспериментальных данных и которые в настоящее время характеризуют наши знания в этой области науки.

Классификация уравнений, описывающих затухание амплитуд с расстоянием, проведена в работах [Trifunac, 1980; Draper, Smith, 1981; Caillot, Bard, 1993], авторы которых фактически разделяют имеющиеся уравнения на два больших класса – теоретические формулы, отражающие установленные физические взаимосвязи, и формулы эмпирического характера. Более подробная классификация и оценки точности выделяемых классов уравнений приведена в работе [Аптикаев, 1983], где автор выделил 3 группы таких формул: теоретические, полуэмпирические и эмпирические. Полуэмпирическими названы формулы, вид которых задавался заранее, а коэффициенты подбирались по эмпирическим данным. Точность теоретических формул для амплитуды в ближней зоне (8 - 9 баллов) составляет 0.3 единиц десятичного логарифма: точность полуэмпирических формул около 0.25 единиц десятичного логарифма, а точность чисто эмпирических формул составляет 0.17 единиц десятичного логарифма.

С накоплением записей сильных движений грунта пришло понимание того, что классические формулы плохо согласуются с экспериментальными данными. Поскольку было обнаружено, что описание затухания одной формулой для различных расстояний сопровождается значительными ошибками, некоторые авторы стали использовать различные функции затухания в различных диапазонах расстояний [Trifunac, 1976; Blume, 1977; McGuire, 1977; Аптикаев, Копничев, 1979; Aptikaev, Kopnichev, 1980; Аптикаев, 1983; Sabetta, Pugliese, 1987; Campbell, 1997 и др.].

Большим достижением явился переход от использования эпицентрального и гипоцентрального расстояний [Штейнберг, 1985; Idriss, 1993; Shoushtari et al., 2016 и др.] к кратчайшему расстоянию до поверхности разлома [Joynes, Boore, 1981; Махдавиан и др., 2005; Graizer, Kalkan, 2007; Sedaghati, Pezeshk, 2016 и др.].

В уравнениях затухания используются различные магнитуды: локальные [Cornell et al., 1979; Niazi, Bozorgnia, 1991; Campbell, 1989; Bragato, 2009; Zuccolo et al., 2017 и т.д.], магнитуда Японского метеорологического агентства [Lussou, et al., 2001; Molas, Yamazaki, 1995, 1996], моментная магнитуда [Sadigh et al., 1997; Abrahamson, Silva, 2008; Graizer, Kalkan, 2011; Idini et al., 2017; Коновалов и др., 2018] и т.п. Однако и локальная магнитуда, и магнитуды, подобные магнитуде Японского метеорологического агентства имеют ограниченное применение, а моментная магнитуда, несмотря на все ее преимущества, не определяется для слабых событий. Поэтому часто на практике в уравнениях затухания используют магнитуду по поверхностным волнам  $M_S$ . [Smit et al., 2000; Crouse, McGuire, 1996; Sarma, Srbulov, 1998; Аптикаев, 2012; Amiri et al., 2010].

В ряде работ отмечается, что уровень колебаний определяет величину декремента поглощения [Давиденков, 1938; Сорокин, 1951; Аптикаев, 1969, 1999].

Многочисленные работы посвящены влиянию грунтовой толщи на уровень ускорений [Field, 2000; Lussou et al., 2001; Sokolov et al., 2004; Павленко, 2009; Sedaghati, Pezeshk, 2017; Skarlatoudis et al., 2013; Калинина и др., 2017 и др.]. В работах последних лет наметился переход от дискретной характеристики грунтов по категориям к непрерывной, основанной на использовании 30-метровой

верхней грунтовой толщи [Idriss, 2009; Cauzzi et al., 2015; Graizer, Kalkan, 2016; Kuehn, Scherbaum, 2016; Алешин, 2017 и др.]. В настоящее время в сейсмостойком строительстве сейсмическая интенсивность связывается только с уровнем ускорений. И действительно, возрастание амплитуды колебаний пропорциональное корню квадратному из акустической жесткости грунтов, было подтверждено экспериментально при регистрации слабых колебаний. Во многих отечественных публикациях по микрорайонированию принято считать, что на грунтах I категории по сравнению с грунтами II категории происходит уменьшение сейсмической интенсивности на один балл, а на грунтах III категории, наоборот, усиление эффекта на один балл. При этом предполагаются соответствующие изменения в уровне амплитуд. Однако эмпирические данные при высоких интенсивностях показывают, что, скорее наоборот, амплитуды выше на скальных грунтах [Trifunac, 1976; Campbell, 1981; 1989; 1997; Chiaruttini et al., 1979, 1981; Бондаренко и др., 2000]. Тем не менее, близкие по форме и уровню колебания вызывают более серьезные повреждения сооружений, возведенных на плохих (с точки зрения строителей) грунтах [Аптикаев и др., 1967; Аптикаев, 1973; Neumann, 1954; Dvorak, 1965 и др.].

То, что уровень колебаний является лишь одним из факторов, определяющих сейсмическую интенсивность, отмечалось давно. В работе [Николаев, 1965] экспериментально установлено, что приращение интенсивности теснее коррелируется не с приращениями амплитуды (даже при слабых колебаниях), а со скоростью распространения сейсмических волн, коэффициентом поглощения и другими параметрами грунтов, связанными с их прочностными свойствами. Этот факт отмечен в [Neumann, 1954], где предложены различные инструментальные шкалы сейсмической интенсивности для рыхлых и скальных грунтов, а также для различных расстояний.

### 1.2.2 Отношение уровней горизонтальных компонент

Много внимания уделяется моделированию среднегеометрической горизонтальной компоненты [Campbell, Bozorgnia, 2007; Boore, Atkinson, 2007; Aghabarati, Tehranizadeh, 2008; Kuehn, Scherbaum, 2015; Soghrat, Ziyaeifar, 2017 и др.] и влиянию на нее различных факторов. Авторы этих многочисленных работ придерживаются мнения о том, что использование среднегеометрической компоненты ведет к более точным и универсальным результатам, как бы нивелирует особенности двух горизонтальных компонент. Однако другие авторы доказывают необоснованность такого мнения [Youngs et al., 1988; Bragato, Slejko, 2005; Massa et al., 2007; Pousse et al., 2005 и др.]: использование любой комбинации компонент не влияет на точность уравнений затухания, а величины максимальных амплитуд на двух горизонтальных компонентах тесно скоррелированы.

Соотношение амплитуд на различных компонентах зависит от многих факторов. Часто принимают колебания в горизонтальной плоскости линейно поляризованными. На основании этого допущения рассчитывают теоретическое соотношение между компонентами, а затем вычисляют “полный вектор”. При этом необоснованно принимается, что максимумы на различных компонентах возникают в одно и то же время. Тот, кто видел записи сейсмических колебаний, записанных с помощью сейсмокопа, никогда не будет пользоваться таким допущением. Гораздо лучше подходит модель поляризации колебаний по эллипсу. Да и с теоретической точки зрения максимальные амплитуды колебаний грунта обычно связаны с поперечными волнами, которые являются по своей сути поворотными колебаниями.

Оценки влияния уровня колебаний на соотношение амплитуд на различных компонентах показано в работах [Iwasaki et al., 1978; Ambraseys, 1978, 1995; Murphy, O'Brien, 1978; Mikhailova, Aptikaev, 1996]. Исследовалось также влияние типа грунта на рассматриваемую величину [Joyner, Boore, 1981].

В работах [Campbell, 1981; 1997; Joyner, Fumal, 1984] установлено, что более интенсивная из двух горизонтальных компонент в 1.12 раз превышает среднегеометрическое для двух горизонтальных компонент для ускорений и в 1.17 раз для скоростей. Эти значения существенно меньше стандартных отклонений оценок самих амплитуд.

### 1.2.3 Уровень вертикальной компоненты

Исследование вертикальной компоненты сейсмического движения грунта – важная задача инженерной сейсмологии сегодня. Однако количество публикаций, посвященных этой проблеме, относительно невелико [Abrahamson, Litehiser, 1989; Sadigh et al., 1997; Niazi, Bozorgnia, 1991; Ambraseys, 1995; Aydan et al., 1996; Campbell, 1997; Ambraseys, et al., 2005 a, b; Gómez-Bernal et al., 2012; NGA-West2 ..., 2013; Marin et al., 2004; Stewart et al., 2016; Çagnan et al., 2017 и др.], что, по-видимому, связано с недооценкой в прежние годы роли вертикальной составляющей при прогнозе сейсмических воздействий.

В настоящее время считается доказанным, что вклад этой компоненты в сейсмические нагрузки на сооружения значителен, и учет ее необходим.

Традиционно уровень вертикального движения определяется через соотношение горизонтальных и вертикальных ускорений.

В работе [Aydan et al., 1996] авторы приводят следующее уравнение (не указывая значение стандартного отклонения  $\sigma$ ), позволяющее оценить отношение двух компонент в зависимости от магнитуды землетрясения (в обозначениях авторов):

$$PGA_Z / PGA_H = 0.217 + 0.046 M_S, \quad (1.2)$$

где  $PGA_H$  – пиковое ускорение грунта на горизонтальной компоненте,

$PGA_Z$  - пиковое ускорение грунта на вертикальной компоненте,

$M_S$  – магнитуда по поверхностным волнам.

В Руководстве по безопасности атомных станций, изданном МАГАТЭ [SSG-9, 2010], отмечается, что соотношение между уровнями колебаний на вертикальной и горизонтальной компонентах колеблется от 0.5 до 1.0, и рекомендуется использовать промежуточное значение 2/3.

В строительных нормах СП 14.13330.2018 расчетную вертикальную сейсмическую нагрузку принимают в зависимости от типа конструкции в 1.3 - 1.5 раз меньше горизонтальной. Заметим, что по нашим данным такое соотношение в среднем соответствует сейсмической интенсивности около 8 баллов.

В нормативных документах Госатомнадзора России по определению исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ [РБ-006-98] соотношения между вертикальной и горизонтальной компонентами приняты по работе [Mikhailova, Artikaev, 1996]. В работе убедительно показано, что это соотношение определяется уровнем амплитуды: уровень вертикальной компоненты вдвое меньше уровня наиболее интенсивной горизонтальной компоненты  $PGA_{Hmax}$  в том случае, когда  $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$ . Затем уровень вертикальной компоненты нарастает быстрее горизонтальной; и около  $800 \text{ см/с}^2$  обе компоненты уравниваются, после чего пиковая амплитуда вертикальной компоненты становится больше горизонтальной. В СП 286.1325800.2016, являющимся документом добровольного применения, принято, что для 7 баллов это отношение в среднем равно 0.5, для 8 баллов – 0.7 и для 9 баллов – 0.9. Эти оценки получены по весьма представительному количеству данных. Тем не менее, в СНиП, являющимся документом обязательного применения, по-прежнему используется средняя оценка.

Работы по влиянию других факторов на соотношение амплитуд на различных компонентах нам неизвестны. Такими факторами могут быть тип подвижки в очаге, расстояния, тип грунта.

Принято считать, что взбросы и сбросы вызывают колебания с повышенным уровнем вертикальной компоненты, а сдвиги - с повышенным

уровнем горизонтальной [Левшин, Грудева, 1974]. Однако в работах [Аптикаев, Копничев, 1979; Aptikaev, Kopnichev, 1980; Campbell, Bozorgnia, 1994] показано, что наивысший уровень вертикальной составляющей приходится на сдвиги. Впрочем, объем выборок в этих работах был невелик, и оценки укладывались в рамки стандартных отклонений.

#### **1.2.4 Преобладающий период колебаний ускорений грунта**

Период колебаний является параметром, характеризующим частотный состав колебаний грунта. В литературе можно найти многочисленные попытки по-разному определить эту характеристику. В качестве таковой принимаются и классический преобладающий период спектра Фурье, и нормализованный по различным величинам преобладающий период спектра Фурье, (главный период, средний период, сглаженный период и т.д.), и преобладающий период спектра реакции, и видимый период и т.д. [Green et al., 2011; Yang, Wang, 2012; Yang et al., 2015; Wu, Kanamori, 2005; Wolfe, 2006; Kramer, 2009; Rathje et al., 2004] и др. Авторы работы [Green et al., 2011] насчитали до 28 различных периодов, использующихся в задачах, связанных с инженерной сейсмологией. Однако наибольшей популярностью пользуется преобладающий в спектре период колебаний грунта.

Основными факторами, определяющими этот параметр, являются энергия источника и расстояние от источника до точки наблюдения.

В работах [Yamaguchi et al., 1978; Nakamura, 1988; Allen, Kanamori, 2003; Kanamori, 2005; Olson, Allen, 2005; Wolfe, 2006] авторы отмечают рост преобладающего периода с увеличением магнитуды землетрясения.

В работах [Graizer, Kalkan, 2007, 2009, 2011; Kalkan, Chopra, 2010] указывается, что при рассмотрении спектров землетрясений с магнитудами от 4.9 до 7.6 – 7.9 максимум спектра, т.е. его преобладающий период, смещается с 0.15 с до 0.5 с.

В то же время преобладающий период возрастает и с расстоянием от очага [Abrahamson, Silva, 1997; Kalkan, Chopra, 2010; Graizer, Kalkan, 2007, 2009]. Так, при землетрясении Чи-Чи 1999 г. с магнитудой 7.6 преобладающий период возрастает со значения 0.35 с на расстояниях от 0 до 20 км до величины 1.2 с на расстояниях от разлома 120 – 140 км [Graizer, Kalkan, 2007, 2009].

Отметим, что в выборках данных магнитуда и расстояние коррелируются. Землетрясения малых магнитуд регистрируются только на малых расстояниях, записи сильных землетрясений преобладают на больших расстояниях. Поэтому корреляция значений параметров только с магнитудой или только с расстоянием приводит к существенно завышенным значениям коэффициента пропорциональности.

Коэффициенты формул, связывающие значения преобладающих периодов с магнитудой и расстоянием, для различных сейсмоактивных регионов близки. Например, в работе [Чернов, 1989] при изучении Газлийских землетрясений для периодов ускорений установлено следующее корреляционное соотношение:

$$\lg T_0 = 0.15 M_S + 0.14 \lg R - 1.66 \pm 0.16, \quad (1.3)$$

где  $T_0$  - преобладающий период колебаний,

$M_S$  - магнитуда по поверхностным волнам,

$R$  - эпицентральное расстояние.

Заметим, что в этой работе данные для ближней и дальней зон обрабатывались совместно.

Для другого района - Туркменистана - в работе [Гарагозов, 1999] приведена следующая зависимость:

$$\lg T_0 = 0.2 M_S + 0.25 \lg R - 2.0 \pm 0.19. \quad (1.4)$$

В работах [Аптикаев и др., 1979 а, б; Аптикаев, Копничев, 1979; Аптикаев, Нерсесов, 1980; Аптикаев, 1983 и др.] на основе эмпирических данных, полученных в Калифорнии и на Северном Тянь-Шане, приводится следующая формула:

$$\lg T_0 = 0.15 M_S + 0.25 \lg R - 1.9 \pm 0.16. \quad (1.5)$$

Указывается, что свободный член в уравнениях зависит от местных условий, причем тип грунтов играет несущественную роль. На станциях, разнесенных на 25 км и находящихся, казалось бы, в одинаковых условиях, видимые периоды могут систематически различаться в два-три раза в широком диапазоне магнитуд и периодов.

С другой стороны, в ряде работ, например, [Rathje et al., 2004], указывается, что учет грунтовых условий значительно повышает точность прогноза преобладающего периода.

Согласно [Михайлова, 1996], преобладающий период колебаний зависит от грунтовых условий и может быть оценен по эмпирическим соотношениям:

$$\lg T(A) = 0.15 M_S + 0.25 \lg R - 1.95 \pm 0.27 \text{ для рыхлых грунтов и } \quad (1.6)$$

$$\lg T(A) = 0.15 M_S + 0.25 \lg R - 2.01 \pm 0.23 \quad (1.7)$$

для толщи валуногалечника значительной мощности.

Авторы работ [Kalkan, Chopra, 2010 Graizer, Kalkan, 2007, 2009, 2011] установили, что преобладающий период колебаний на участках со скальными грунтами меньше, чем на участках с рыхлыми при прочих равных условиях (рассматривались одни и те же землетрясения). При этом в области коротких периодов спектральные амплитуды колебаний на твердых грунтах (на одних и тех же периодах) превышают спектральные амплитуды на рыхлых, а в области периодов больше 0.3 с наблюдается обратная картина: амплитуды на рыхлых

грунтах оказываются больше, чем на скальных. Таким образом, весь спектр как бы сдвигается в область длинных периодов при переходе от скальных грунтов к рыхлым (аналогично сдвигу преобладающего периода).

На коротких расстояниях ощутимо влияние направленности излучения: движение на объект значительно увеличивает период [Somerville et al., 1997; Rathje et al., 2004; Rowshandel, 2006].

В некоторых работах отмечается зависимость преобладающего периода колебаний от скорости распространения волн в очаговой области [Соловьев, Пустовитенко, 1964; Аптикаев, 1969].

В работе [Mikhailova, Aptikaev, 1996] исследовалась связь видимого периода колебаний с преобладающим периодом спектра. Было установлено, что преобладающий период  $T_0$  спектра реакции связан с видимым периодом  $T_{RS}$  акселерограммы соотношением:

$$\lg T_{RS} = \lg T_0 \pm 0.10. \quad (1.8)$$

Существуют корреляционные формулы и для преобладающего периода спектра колебаний. Например, в работе [Graizer, Kalkan, 2009] авторы предлагают следующую аппроксимационную формулу для преобладающего периода спектра реакции при 5%-ном затухании (в обозначениях авторов  $T_{spec,0}$ ):

$$T_{spec,0}(M, R) = 0.0022 R + 0.63 M - 0.0005 V_{S,30} - 2.1, \quad (1.9)$$

где  $V_{S,30}$  – средняя скорость поперечных волн в верхней 30-метровой толще,  
 $R$  – кратчайшее расстояние до плоскости разлома,  
 $M$  – моментная магнитуда.

Отметим, что в отличие от других авторов логарифмирование периодов не производится.

Наиболее полный обзор работ, посвященных преобладающему периоду колебаний, приведен в работах [Rathje et al., 1998, 2004; Graizer, Kalkan, 2007, 2009; Аптикаев, 2012].

### **1.2.5 Частотный состав колебаний**

Частотный состав колебаний наилучшим способом можно описать спектром [Yang et al., 2015; Geller, 1976; Bouckovalas et al., 2006; Kramer, 2009]. Наиболее часто в инженерных расчетах используется спектр реакции (спектр ответа) [Newmark, Hall, 1982; Lee, 2002; Graizer, Kalkan, 2009]. Кроме того, следует напомнить, что нормированный спектр реакции обладает тем свойством, что, как величина безразмерная, не зависит от магнитуды землетрясения.

Многие исследователи предполагают, что высокие частоты затухают более интенсивно [Booge, 1983, 2003; Papageorgiou, Aki, 1983; Hanks, 1982; Anderson, Hough, 1984; Kramer, 2009 и др.]. Для малых деформаций это предположение справедливо. На этом основывается зависимость спектра от расстояния. Однако при сильных движениях экспериментальные данные показали, например, [Аптикаев, 1964; 1969; Trifunac, Ivanović, 2003a, 2003b; Trifunac, Todorovska, 2000a, 2000b; Аптикаев, Эртелева, 2014; Lee et al., 2015 и др.], что декремент поглощения определяется уровнем колебаний, а не только зависит от свойств среды. В то же время в ближней зоне, где наблюдаются различного рода нелинейные явления, спектр обогащается высокими частотами [Аптикаев, 1969; Beresnev, 2002; Beresnev et al., 1998; Roumelioti, Beresnev, 2003]. Все это чрезвычайно затрудняет прогноз сильных движений грунта.

Рассмотрение формы спектра проведено в работах [Silva et al., 2001; Chopra, 2007; Graizer, Kalkan, 2007, 2009, 2011; Kalkan, Chopra, 2010].

В работе [Silva et al., 2001] предложены следующие формулы, описывающие зависимость формы спектра от магнитуды и расстояния:

$$\ln[SA(f)/PGA] = \frac{C_1}{\cosh(C_2 f^{C_3})} + C_4 \left[ \frac{\exp(C_5 f)}{f^{C_6}} + \frac{C_7 \exp(C_8 f)}{f^{C_9}} \right]^{1/2} \quad (1.10)$$

для центральных и восточных районов США,

и

$$\ln[SA(f)/PGA] = \frac{C_1}{\cosh(C_2 f^{C_3})} + C_4 \left[ \frac{\exp(C_5 f)}{f^{C_6}} \right] \quad (1.11)$$

где  $f$  – частота,

$C_1, C_2, \dots, C_9$  – коэффициенты, являющиеся функциями магнитуды и/или расстояния и получаемые с использованием набора эмпирических спектральных форм с шагом 0.1 магнитуды для диапазона магнитуд от 5.0 до 8.0 и для расстояний от разлома 0.1, 1, 2, 3, 5, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 85, 100, 125, 150, 175 и 200 км.

Каждая спектральная форма определяется набором из 14 значений в частотном диапазоне от 0.1 до 100 Гц. В обеих формулах второй член был добавлен к низкочастотной части для того, чтобы обеспечить более гибкую форму спектра.

В работе [Graizer, Kalkan, 2009] получено следующее соотношение для средней формы спектра (при 5% затухании):

$$SA_{norm}(T/M, R, V_{S,30}) = (0.017M + 1.27)e^{0.0001R} \times e^{(-1/2((\ln T - 0.0012R - 0.4087M + 0.0006V_{S,30} + 3.63)/(0.001R - (0.077M + 0.3251)))^2} + \left[ \left(1 - (T/T_{sp,0})^{1.5}\right)^2 + 4(0.75)^2(T/T_{sp,0})^{1.5} \right]^{(-1/2)}, \quad (1.12)$$

где  $T_{sp,0} = f(M, R, V_{S,30})$  – преобладающий период спектра, являющийся функцией магнитуды, расстояния и грунтовых условий;

$V_{S,30}$  – средняя скорость поперечных волн в верхней 30-метровой толще,

$T$  – текущий спектральный период,

$R$  – кратчайшее расстояние до плоскости разлома,

$M$  – моментная магнитуда,

Как указывают авторы, большинство использованных ими записей сильных движений были отфильтрованы на длинных периодах с частотой обрезания от 3 до 5 с. Особо подчеркивается, что полученные формулы не имеют под собой какой-либо физической основы (не соответствуют какому-либо физическому закону), а лишь наиболее точно описывают форму спектра.

В ряде работ [Аптикаев, 2012; Зайнутдинова, 1988; Ли, 1990; Михайлова, 1988, 1996; и др.] показано, что форму спектра удобно описывать в двойном логарифмическом масштабе, используя в качестве одной из основных характеристик логарифмическую ширину, например, в октавах – величину безразмерную и, следовательно, не зависящую от магнитуды.

Для описания формы спектры часто используется и такой параметр как  $\kappa$  (“каппа”) – характеристика спада спектра  $S$ -волны на высоких частотах. Каппа представляет собой член, зависимый от расстояния и грунтовых условий: чем длиннее  $\kappa$ , тем более мягким является грунт [Anderson, Hough, 1984; Hough et al., 1988; Ktenidou et al., 2014].

Заметим, что типовые спектры, применяемые в строительных нормах многих стран, являются не средними спектрами, а результатом почастотного осреднения множества спектров. [РБ-006-98, НП-01-31 и др.]. Применение почастотного осреднения ведет к существенному занижению уровня, расширению полосы частот.

### 1.2.6 Продолжительность сейсмических колебаний

Одной из важных характеристик сейсмического движения грунта является продолжительность колебаний [Arias, 1970; Lee et al., 1972; Айзенберг, 1975; Аптикаев, 1975; A Workshop..., 1989; Rauch, Martin, 2000]. Тем не менее, некоторые специалисты вообще не придавали этому параметру большого значения, например, [Медведев, 1968]. Этот вопрос актуален и сегодня [Bommer, Martínez-Pereira, 1999; Hancock, Bommer, 2006; Bommer et al., 2009; Kempton, Stewart, 2006; Liu et al., 2001; Priestley et al., 2007 и др.].

В зависимости от использованных данных разрабатывались прогнозные уравнения продолжительности колебаний и для отдельных районов, и универсальные. Так, например, для Центральной Калифорнии такие формулы приведены в работе [Trifunac, Novikova, 1995], для территории бывшей Югославии в работах [Novikova et al., 1993, 1995a, 1995b], для землетрясений Японии в работе [Shoji et al., 2005], для землетрясений Тайваня в работе [Lee Y.-T. et al., 2015], а для землетрясений Новой Зеландии в работе [Stafford et al., 2009] и т.п. Необходимость учета продолжительности колебаний даже упоминалась в некоторых нормативных документах, например, [SSG-9, 2010; Вознесенский, 1998; РБ-006-98; ГОСТ 26883-86; Eurocode 8; Selecting..., 2010]. Однако каким образом учитывать этот параметр нигде, кроме последнего упомянутого документа, ничего не говорится.

Затруднения связаны и с тем, что существует много различных определений этой величины с различным физическим смыслом [Харкевич, 1962; Arias, 1970; Bolt, 1973; Trifunac, Brady, 1975; Martin, Haresh, 1979; Аптикаев, 1981; Liu et al., 2001; Bommer et al., 2009; Lee Y.-T. et al., 2015]. Есть также случаи путаницы различных определений. Например, в отечественном нормативном документе для объектов ядерной энергетики РБ-006-98 приводятся три противоречащих друг другу определения продолжительности колебаний.

Согласно определению, предложенному Болтом [Bolt, 1973], продолжительность - это интервал между первым и последним разом превышения

амплитуд записи некоторого фиксированного порога  $PGA_n$ . Эту величину называют “bracketed duration” и обозначают  $D_B$ . Для ускорений грунта было принято  $PGA_n = 0.05 g$ , для регистрации колебаний зданий и сооружений  $PGA_n = 0.1 g$ . Это определение часто употребляется и сегодня при решении широкого круга теоретических и практических задач [McGuire, Barnhard, 1979; Kawashima, Aizawa, 1989; Stafford, 2008; Bommer et al., 2009 и др.].

Из приведенного определения видно, что такая продолжительность тесно коррелируется с уровнем колебаний и, следовательно, не является независимой характеристикой процесса. Очевидно, что при слабых колебаниях (ниже 7 баллов) такое определение использовать невозможно: амплитуды ускорений не достигают порогового значения. Это обстоятельство является одним из существенных недостатков рассматриваемого определения. Следует отметить, что в более поздних работах авторы, пытаясь исправить этот изъян, в качестве порогового значения принимают для ускорений грунта и  $PGA_n = 0.025 g$  [Bommer et al., 2009], и  $PGA_n = 0.01 g$  [Lee Y.-T. et al., 2015]. Однако, очевидно, что для более слабых колебаний данное определение по-прежнему остается неприемлемым.

Так называемая однородная (“uniform”) продолжительность  $D_U$ , фактически является аналогом приведенной выше продолжительности  $D_B$ : это интервал, на котором амплитуды записи превышают некоторый фиксированный порог  $PGA_n$ . В силу ее аналогичности с продолжительностью  $D_B$  к ней также относятся все приведенные выше замечания.

Стандартная (“standard”) или значимая (“significant”) продолжительность ( $D_S$ ) определяется как интервал времени, в течение которого величина

$$F(t) = \int_{t_1}^{t_2} A^2 dt / \int_0^{\infty} A^2 dt, \quad (1.13)$$

где  $A$  - текущая амплитуда ускорений,

возрастает от  $F(t_1)=0.05$  до  $F(t_2)=0.95$  [Vanmarke, Lai, 1980]. Используются и другие пороговые значения, например,  $F(t_1)=0.05$  и  $F(t_2)=0.75$  (фактически выбор верхней границы интервала зависит от того, тип какой волны рассматривается), что не меняет смысла определения. Приведенное выше уравнение соответствует “энергии” по Айрису [Arias, 1970]. Определенная таким образом продолжительность широко используется на практике (см., например [Hernandez, Cotton, 2000; Stafford et al., 2009; Antoineta et al., 2017]). Однако экспериментально установлено, что она при прочих равных условиях имеет отрицательную корреляцию с сейсмической интенсивностью, то есть более продолжительные колебания представляют меньшую опасность. Чем больше величина  $D_S$ , тем более вялый процесс происходит, тем ниже сейсмическая интенсивность. Этот факт объясняется тем, что рассматриваемая величина характеризует время накопления заданной энергии.

Эффективная продолжительность колебаний – еще одно из определений продолжительности колебаний. Если определение “bracketed” продолжительности основано на амплитуде колебаний, а определение стандартной продолжительности – на рассмотрении энергии колебаний, то эффективная продолжительность – это попытка рассмотреть продолжительность колебаний и с позиций амплитуды колебаний, и с позиций выделившейся энергии одновременно. Длительность при этом определяется как промежуток времени, в течение которого на участке записи с амплитудами колебаний, больше или равными определенному уровню (например, 0.01 g), энергия возрастает от 5% до 95%. Данное определение продолжительности впервые было введено в работе ученых из Тайваня [Lee Y.-T. et al., 2015]. Авторы подчеркивают, что данное определение введено ими для оценки продолжительности именно сильных движений грунта в задачах оценки сейсмической опасности. Однако несложно заметить, что введенная таким образом продолжительность будет обладать недостатками и продолжительности по Болту (т.к. имеет ограниченное применение), и значимой продолжительности (т.к. по-прежнему будет иметь отрицательную корреляцию со степенью повреждения зданий).

Много путаницы с определением длительности колебаний и в российских нормативных документах. Например, в ГОСТ 26883-86, регламентирующем используемые в инженерном деле термины и определения, приводится определение этой величины, совершенно непригодное для инженерных целей: “Длительность есть интервал времени, в течение которого уровень колебаний на 10% превышает уровень фоновых колебаний”.

По Аптикаеву [Аптикаев, 1972, 2012; Аптикаев и др., 1979в; Artikaev, 2009] длительность основной фазы колебаний определяется как интервал времени, в течение которого амплитуда огибающей колебаний превышает половину максимального уровня. Следовательно, в этом случае, чем больше длительность, тем больше энергия. Автором по аналогии с радиолокацией такой продолжительности дано название “ширина импульса” [Аптикаев, 2012].

Численная оценка влияния ширины импульса  $\tau$  на сейсмическую интенсивность  $I$  впервые приведена в работах [Аптикаев, 1972; 1975]. Если стандартное отклонение для пары величин  $\lg PGA - I$  равно 0.6 единиц десятичного логарифма (ед. дес. логарифма), то учет продолжительности  $\tau$  (сравнение интенсивности  $I$  и произведения  $(\lg PGA) \times (0.5 \lg \tau)$ ) снижает величину стандартного отклонения до 0.35 ед. дес. логарифма [Аптикаев, 2012]. Авторы работы [Wommer et al., 2009] также отмечают зависимость степени повреждения от продолжительности. Причем результат зависит от выбранного определения продолжительности, а именно, из 2 событий с одинаковыми пиковыми ускорениями большие повреждения несет то, которое имеет большую продолжительность, и в то же время из 2 событий с одинаковой энергией большой ущерб наносит то, которое имеет меньшую продолжительность.

Выражение для оценки ширины импульса [Artikaev, 2009; Аптикаев, 2012] имеет вид:

$$\lg \tau = 0.15M_S + 0.5 \lg R + C_1 + C_2 + C_3 \pm 0.3, \quad (1.14)$$

где  $C_1 = 0.25$  для сбросов,  $C_1 = 0.00$  для сдвигов и  $C_1 = -0.25$  для взбросов;

$C_2 = -0.15$  для грунтов I категории,  $0.00$  – для грунтов II категории и  $0.45$  для грунтов III и IV категорий;

среднее значение коэффициента  $C_3 = -1.3$ .

Как видно, последняя формула довольно проста в применении на практике.

В качестве меры продолжительности колебаний используется и количество циклов [Liu et al., 2001; Green, Terri, 2005; Hancock, Bommer, 2005; Lasley et al., 2017].

Так, в работе [Lasley et al., 2017] авторы предлагают следующие соотношения, позволяющие рассчитать количество циклов:

$$\ln(n) = a_1 + a_2 \ln(a_{max}) + a_3 M_W + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (1.15)$$

где  $a_{max}$  – пиковое ускорение грунта в долях  $g$ ;

$M_W$  – моментная магнитуда;

$a_1, a_2, a_3$  – регрессионные коэффициенты, которые вычисляются, исходя из имеющихся данных;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – поправки.

Другое выражение имеет вид:

$$\ln(n) = b_1 + b_2 M_W + b_3 \ln(R) + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (1.16)$$

где  $M_W$  – моментная магнитуда;

$R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разрыва;

$b_1, b_2, b_3$  – регрессионные коэффициенты, которые вычисляются, исходя из имеющихся данных;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$  – поправки.

В обеих формулах грунтовые коэффициенты берутся с учетом 30-метровой толщи. Авторы особо отмечают, что наблюдается сильная отрицательная корреляция между количеством циклов и пиковым ускорением грунта.

Заметим, что с точки зрения теории размерностей и подобия величина  $n$  безразмерная и не должна зависеть от магнитуды.

### 1.2.7 Спектральные амплитуды сейсмических колебаний

Один из важнейших параметров в спектральной области - амплитуды спектров сейсмических колебаний. Работы, посвященные этому параметру многочисленны и разнообразны так же, как и работы, посвященные исследованию амплитуд сейсмических колебаний во временной области.

Часть работ посвящена выводу уравнений затухания для конкретного региона [Niazi, Bozorgnia, 1992; Lee, Manić, 1994; Fukushima et al., 1995; Atkinson, Boore, 1995; Sabetta, Pugliese, 1996; Abrahamson, Silva, 1997; Lussou et al., 2001; Berge-Thierry et al., 2003; Bragato, Slejko, 2005; Bindi et al., 2007, 2010; Massa et al., 2008; Anderson, Uchiyama, 2011; Chopra, Choudhury, 2011; Tusa, Langer, 2016; Soghrat, Ziyaeifar, 2017; Sedaghati, Pezeshk, 2017; García-Soto, Jaimes, 2017].

В отдельных работах рассматриваются только горизонтальные [Spudich et al., 1999; Atkinson, Boore, 2003; Idriss, 2008, 2014; Moss, 2011; Bozorgnia et al., 2010; Lin et al., 2011; Boore et al., 2014; Chiou, Youngs, 2008; Skarlatoudis et al., 2013; Vacareanu et al., 2014a, 2015; Zhao et al., 2016a; 2016b; 2016c; Bindi et al., 2017; Zuccolo et al., 2017; Montalva et al., 2017] или только вертикальные компоненты [Ambraseys, Simpson, 1996; Kalkan, Gülkan, 2004; Ambraseys et al., 2005b; Bozorgnia, Campbell, 2016; Stewart et al., 2016; Gülerce et al., 2017].

Сами уравнения затухания содержат те же параметры, что и уравнения затухания пиковых амплитуд во временной области: магнитуду, расстояние, характеристики грунтов [Campbell, 2000; Campbell, Bozorgnia, 2003; Ambraseys, Douglas, 2003; McVerry et al., 2006; Aghabarati, Tehranizadeh, 2009; Sharma et al., 2009; Akkar, Çagnan, 2010; Chiou, Youngs, 2014; Akkar et al., 2014 a, b; Abrahamson

et al., 2014; Zhao et al., 2015; Landwehr et al., 2016; Lanzano et al., 2016; Shahidzadeh, Yazdani, 2017 и др.]

Результаты исследований различных зависимостей качественно аналогичны результатам, полученным при исследовании зависимостей пиковых ускорений от различных параметров и рассмотренных выше (см. разделы 1.2.1 – 1.2.6). Последнее и понятно: спектральные амплитуды, как известно [см., например, Hudson, 1979; Chopra, 1995; Kramer, 2009 и др.], функционально связаны с пиковыми амплитудами ускорений грунта (прямо пропорциональны).

### 1.2.8 Коэффициент динамического усиления $\beta$

Коэффициент динамического усиления является наглядной характеристикой спектра реакции и широко используется в различных инженерных расчетах [Mohraz, 1976, 1978, 1992; Dunbar, Charlwood, 1991; Xu et al., 2014; Hall et al., 1976; Newmark, Hall, 1982; Барштейн, 1960; Назаров и др., 1984; Николаенко, Назаров, 1988; Назаров, 2010, 2012, 2015; Карапетян, 2012; Хачиян, 2008; Штейнберг и др., 1993; Григорян, Карапетян, 2011; Zamora, Riddell, 2011]. Довольно часто этот параметр упоминается в связи с изучением влияния грунтов на амплитуды сейсмических колебаний [Mohraz, 1976; McGuire, 1995; Pitilakis et al., 2004; 2015; Baker, 2010; Malhotra, 2006; Заалишвили, 2000; Алешин, 2010, 2017; Markušić et al., 2002; Li et al., 2016]. Применяется он и в различных строительных нормах и правилах [СП 14.13330.2018; СП 283.1325800.2016; СП 286.1325800.2016; НП-031-01; ASCE/SEI Standard 7-10, 2010; CSA..., 2010; Nuclear..., 2014; SSG-9, 2010; Standard USNRC R.G. 1.60 и др.].

Несмотря на важность этой величины, взаимосвязи ее с различными факторами, влияющими на формирование спектра колебаний, исследовались лишь немногими исследователями [Mikhailova, Aptikaev, 1996; Ashford et al., 2000; Suetomi et al., 2004; Vacareanu et al., 2014b и др.].

Среди характерных особенностей этой спектральной характеристики следует отметить высокую стабильность ее численного значения: параметр  $\beta$  как

величина безразмерная практически не зависит от магнитуды землетрясения. Мало влияют и другие очаговые параметры, и грунтовые условия. Например, по данным работы [Mikhailova, Artikaev, 1996] среднее значение коэффициента динамического усиления при 5%-ном уровне демпфирования (без учета каких-либо факторов) по мировой выборке данных составляет 3.5; такое же значение независимо получено и авторами работы [Ashford et al., 2000] для конкретного региона – Таиланда. По данным же румынских исследователей [Vacareanu et al., 2014b] этот коэффициент несколько выше - 3.7.

В работе [Mikhailova, Artikaev, 1996] установлены корреляционные соотношения вида

$$\lg PSA_{\xi} = \lg \beta + \lg PGA \pm \sigma, \quad (1.17)$$

определяющие значение параметра  $\beta$  на различных уровнях демпфирования (0%, 2%, 5%, 10% и 20%):

$$\lg PSA_0 = 1.15 + \lg PGA \pm 0.12, \quad (1.18)$$

$$\lg PSA_2 = 0.72 + \lg PGA \pm 0.07, \quad (1.19)$$

$$\lg PSA_5 = 0.54 + \lg PGA \pm 0.08, \quad (1.20)$$

$$\lg PSA_{10} = 0.38 + \lg PGA \pm 0.08, \quad (1.21)$$

$$\lg PSA_{20} = 0.14 + \lg PGA \pm 0.08. \quad (1.22)$$

Некоторые исследователи отмечают зависимость коэффициента динамичности от амплитуды ускорения. В работах [Ashford et al., 2000; Pitilakis et al., 2004; Suetomi et al., 2004; Li et al., 2016] установлено, что при значениях

$PGA < 0.2 g$  значение  $\beta$  остается в среднем постоянным, а при  $PGA > 0.2 g$  – уменьшается.

Кроме того, при больших значениях пикового ускорения не только наблюдается спад коэффициента динамичности, но и сглаживаются “размываются” резонансы в грунтах, вплоть до их полного исчезновения [Lee et al., 2015], что 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.

Несмотря на надежные эмпирические оценки этого коэффициента, в нормативных документах используются другие значения. Для воздействий на объекты ядерной энергетики используется значение  $\beta = 3.2$  [НП-031-01]. Для гражданского строительства значение этого коэффициента снижается до  $\beta = 2.5$  [СП 14.13330.2018]. Последнее значение связано с некорректной обработкой эмпирического материала – почастотным осреднением уровня колебаний.

### **1.3 Скорости сейсмических колебаний**

Не менее важным параметром при оценке сейсмических воздействий является скорость колебаний. Поскольку ранее ускорение считалось основной характеристикой сейсмического воздействия грунта, такому параметру, как скорость, уделялось мало внимания. Однако в последнее время к скорости колебаний интерес резко повысился, что объясняется несколькими причинами. 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 [Бондаренко и др., 2000; Долгая, Индейкин, 2002; Аптикаев, 2012; Muraio et al., 2000; McGarr, Fletcher, 2005; Ay et al., 2006; Yang, Wang, 2012; Sakurai et al., 2012;

Nakami, 2014; Miyakoshi et al., 1998; Akkar, Ozen, 2005; Ghayoomi, Dashti, 2015; Campbell, Bozorgnia, 2012 и др.].

Этот параметр лучше описывает повреждения подземных трубопроводов [Isoyama et al., 2000; O'Rourke, Ayala, 1993; Davis, Bardet, 2000; O'Rourke et al., 1998; Eidinger, 1998; Lanzano et al., 2013].

В некоторых работах скорости колебаний используются при исследовании различных нелинейных явлений, в том числе такого явления как разжижение грунтов [Вознесенский, 1998; Kostadinov, Towhata, 2002; Orense, 2005; Dashti et al., 2010].

Также давно установлена высокая корреляция пиковых скоростей с оценкой интенсивности землетрясений [Медведев, 1968; Wald et al., 1999; Кака, Atkinson, 2004; Hao et al., 2005; Aptikaev et al., 2006; Аптикаев, 2012]. Например, в работе [Аптикаев, 2012] такая связь описывается соотношением:

$$\lg PGV, \text{ см/с} = - 2.23 + 0.47I \pm 0.33. \quad (1.23)$$

При этом указывается, что коэффициент корреляции высок и составляет 0.84.

Напомним, что изучение параметров сейсмического движения грунта с помощью взрывов также проводится по скоростям [Садовский, 1941, 1946; Миронов, 1966; Сафонов, Кузнецов, 1967; Аптикаев и др., 1967; Аптикаев, 1973; Шерман и др., 2000; Koch, 1956; Neuman, 1958; Genschel, 1962; Dvorak, 1965]. Сам по себе такой способ исследования очень удобен, так как в этом случае известны место, время и энергия источника. Оказалось, что скорости колебаний грунта лучше других параметров коррелируют с повреждениями зданий и других сооружений [Садовский, 1939.] При этом значение скорости  $V$  можно рассчитать по формуле:

$$V = \frac{k\sigma}{\alpha\beta} \left( \frac{\sqrt[m]{Q}}{r} \right)^n, \quad (1.24)$$

где  $Q$  – вес заряда;

$k$  – коэффициент, зависящий от способа взрывания и свойств среды;

$\sigma$  - коэффициент плотности заложения шнура;

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий глубину заложения заряда;

$\beta$  - степень экранизации;

$n$  – показатель затухания сейсмических волн с расстоянием;

$m$  – эмпирически определяемая постоянная.

Удивительно, но за прошедшие десятки лет эта формула не изменилась и используется и ныне, см., например, [Гриб и др., 2012]. Большим преимуществом использования скорости колебаний явилось ее согласованность с теорией размерности и подобия.

В настоящее время параметр скорости колебаний используется уже в некоторых нормативных документах, например, в США при расчетах подземных трубопроводов в Федеральном агентстве по чрезвычайным ситуациям (Federal Emergency Management Agency, FEMA) [FEMA, 2003], а также в Американском союзе по системам жизнеобеспечения (American Lifelines Alliance, ALA) [Seismic..., 2001; 2005] и в европейских строительных нормах [Eurocode 8, 2002]. Коллектив узбекских авторов [Артиков и др., 2016; 2018] предлагает использовать скорости для оценки сейсмической опасности территории Республики Узбекистан и построения карт общего сейсмического районирования этой страны. Однако в отечественных строительных нормах и правилах этот параметр пока практически не учитывается. Стоит упомянуть лишь о новом Национальном стандарте Российской Федерации “Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности” [ГОСТ Р 57546-2017], в котором приводится шкала интенсивности по скоростям колебаний грунта.

Традиционно скорости колебаний одновременно с ускорениями и смещениями используются для построения спектров реакции, применяемых в инженерной сейсмологии [Newmark et al., 1973; Trifunac, 1977; Basham et al., 1985; Tso et al., 1992; Bommer et al., 2000; Kramer, 2009; Курбацкий, Баев, 2011;

Trombetti et al., 2008 и др.]. Кроме того, некоторые авторы [Bommer et al., 2000, 2007, 2010; Trombetti et al., 2008] предлагают использовать соотношения пикового ускорения с пиковой скоростью  $PGV / PGA$  для расчета контрольных (угловых) частот спектра, определяющих при построении проектных спектров реакции согласно Eurocode 8 (2002), участки постоянства ускорения, скорости и смещения.

### 1.3.1 Затухание пиковых скоростей грунта

Учитывая, что основным параметром, используемым в инженерной практике, в настоящее время является все же ускорение, не стоит удивляться тому, что работ, посвященных исследованию законов затухания скорости несравненно, в десятки раз, меньше, чем работ, посвященных законам затухания амплитуд колебаний ускорений. Тем не менее, исследования такого рода начались давно, например, см. [Trifunac, Brady, 1976; McGuire, 1978; Joyner, Boore, 1981; Kawashima et al., 1986. и др.].

Сейчас существуют уравнения затухания для различных регионов [Dost et al., 2004; Nguyen et al., 2012; Sedaghati, Pezeshk, 2017; Nekooei, Babaei, 2016; Ibrahim et al., 2016; Emolo et al., 2015; Tusa, Langer, 2016; Kotha et al., 2016; Lanzano et al., 2016; Campbell, Bozorgnia, 2014; Derras et al., 2014; Skarlatoudis et al., 2013; Chiou et al., 2010 и др.], а также и более универсальные, разработанные по выборке мировых данных [Campbell, Bozorgnia, 2006; Chiou, Youngs, 2008; Boore, Atkinson, 2008; Rupakhety et al., 2011; Mohammadnejad et al., 2012;; Stewart et al., 2016 и др.].

В общем случае уравнение затухания пиковых амплитуд скоростей может быть представлено в виде суммы нескольких функций, отражающих влияние магнитуды и других параметров землетрясения, расстояния и грунтовых условий, см., например [NGA-East..., 2015; Boore, Atkinson, 2008; Akkar, Bommer, 2006, 2007]:

$$\lg Y = F_M(M) + F_R(R) + F_f(F) + F_g(S) + \varepsilon, \quad (1.25)$$

где  $F_M$  - член, отражающий влияние магнитуды землетрясения;

$F_R$  – член, учитывающий влияние расстояния;

$F_f$  – член, учитывающий различные параметры очага;

$F_g$  - член, отражающий грунтовые условия в точке наблюдения;

$\varepsilon$  – стандартное отклонение.

Как правило, при изучении затухания сильных движений используются моментная магнитуда (или пересчитанная к моментной) [Sedaghati, Pezeshk, 2017; García-Soto, Jaimes, 2017; Ghofrani, Atkinson, 2014; Idriss, 2014; Bindi et al., 2010; Akkar, Bommer, 2010 и др.]. Однако при использовании записей слабых событий в уравнениях употребляются и другие типы магнитуд [Tusa, Langer, 2016; Emolo et al., 2015; Nguyen et al., 2012; Villalobos-Escobar, Castro, 2013; Jin et al., 2008; Frisenda et al., 2005 и др.].

Очень разнообразны уравнения и по типу используемого расстояния: гипоцентрального и эпицентрального [Чернов, 1989; Niazi, Bozorgnia, 1991; Гарагозов, 1999; Margaris et al., 2002; Massa et al., 2008 и др.], кратчайшего расстояния до разлома [Rupakhety et al., 2011; Boore et al., 2014; Kale et al., 2015; Sedaghati, Pezeshk, 2017 и др.] и т.п.

Например, в работе [Nguyen et al., 2012] приводится уравнение затухания пиковых скоростей для Вьетнама, в котором используются локальные магнитуды и эпицентральные расстояния:

$$\lg PGV, \text{ см/с} = - 3.244 + 0.9008 M_L - \lg R, \text{ км} - 0.00322 R, \text{ км}, \quad (1.26)$$

где  $PGV$  – пиковая скорость в см/с;

$R$  - эпицентральное расстояние в км;

$M_L$  – локальная магнитуда.

Последний член описывает поглощение в среде. При выводе формулы использовались только записи землетрясений Северного Вьетнама, поэтому

неучет механизма очага можно считать допустимым. Диапазон магнитуд  $1.6 < M_L < 4.6$ , расстояний  $5 \text{ км} < R < 500 \text{ км}$ , глубины очагов менее 30 км.

В более ранней работе [Чернов, 1989] для Газлийского района уравнения затухания амплитуд скорости получены с использованием другого типа магнитуды - магнитуды  $M_S$  - и гипоцентрального расстояния  $R_{sun}$ :

$$\lg PGV, \text{ см/с} = - 0.15 + 0.50 M_S + (0.12 M_S - 2.2) \lg R_{sun} \pm 0.26. \quad (1.27)$$

Как видно из формулы (1.27), коэффициент при расстоянии зависит от магнитуды, поскольку с ростом магнитуды увеличивается длина волна и уменьшается декремент поглощения. Отметим, что влияние механизма очага в этой работе не учитывалось, поскольку рассматривались землетрясения одного района.

В работе [Гарагозов, 1999] приводится следующее уравнение затухания пиковых скоростей (с использованием магнитуды  $M_S$ ):

$$\lg PGV, \text{ см/с} = - 1.15 - 2.2 \lg R, \text{ км} + 0.88 M_S \pm 0.28. \quad (1.28)$$

Влияние механизма очага и грунтовых условий автор также не рассматривает. Заметим, что при выводе формулы использовались данные, полученные, главным образом, в дальней зоне.

При исследовании зависимости уровня скоростей от механизма очага [Campbell, 1997; Akkar, Bommer, 2007; Chiou, Youngs, 2008; Chiou et al., 2010 и др.] установлено, что пиковые скорости имеют наибольшие значения для механизма типа взброса, а наименьшие - для сброса при прочих равных условиях. В более сложных моделях, учитывающих параметры очага, такие, как нахождение точки наблюдения на висячем (“hanging wall”) или неподвижном (“footwall”) крыле разлома, отмечается, что на участках, расположенных на висячем крыле, вертикальные компоненты показывают более высокое усиление на высоких частотах, чем горизонтальные при сравнении взбросов и сдвигов. Одновременно

на неподвижном крыле амплитуды горизонтальных и вертикальных движений для взбросов и сдвигов почти одинаковы [Bozorgnia, Campbell, 2016]. |

Некоторые авторы отмечают особенности ближней зоны для скоростей: на близких расстояниях при сильных землетрясениях вертикальная компонента скорости равна или превышает горизонтальную [Bozorgnia, Niazi, 1993; Bozorgnia et al., 1995; Campbell, 1997; Gülerce, Abrahamson, 2011; Akkar et al., 2014a; Bozorgnia, Campbell, 2004, 2016 и др.].

В работе [Артиков и др., 2018] для Восточного Узбекистана предлагается для ближней и дальней зон использовать различные зависимости пиковой скорости от магнитуды и расстояния:

$$\lg PGV = M - 1.7 \lg R + 0.91, \text{ при } 10 < R \leq 100 \text{ км,} \quad (1.29)$$

$$\lg PGV = M - 2.35 \lg R + 2.26, \text{ при } 100 \leq R \leq 500 \text{ км.} \quad (1.30)$$

Из формул (1.29) - (1.30) следует вывод, что затухание амплитуд скоростей в ближней и дальней зонах протекает по различным законам.

Установлено, что точность оценок повышается при введении в уравнения затухания типа грунта [Akkar, Bommer, 2010; Skarlatoudis et al., 2013; Ghofrani, Atkinson, 2014; Sedaghati, Pezeshk, 2017 и др.]. Например, в упомянутой выше работе [Nguyen et al., 2012] авторы указывают, что стандартное отклонение после введения поправки  $S$  за тип грунта (которая рассчитывается отдельно с использованием разности между расчетным и наблюдаемым значением пиковой скорости, а затем используется при прогнозе в виде множителя для расчетного значения скорости, т.е.  $PGV = S \times PGV_{расч.}$ ) уменьшается примерно на 45%.

При исследовании влияния грунтов установлено, что величины амплитуд скорости на мягких грунтах (soft) больше, чем на скальных (rock), а амплитуды на средних грунтах (stiff) имеют промежуточные значения [Akkar, Bommer, 2010 и др.].

Общепризнан и тот факт, что использование кратчайшего расстояния до разлома значительно повышает точность прогноза [Boore, Atkinson, 2007, Akkar, Bommer, 2007, 2010; Rupakhety et al., 2011; Boore et al., 2014; Kale et al., 2015; Sedaghati, Pezeshk, 2017 и др.].

Например, в работе [Akkar, Bommer, 2010] для более широкого региона, включающего Европу, Средиземноморье и Средний Восток получен закон затухания пиковых амплитуд скорости, учитывающий влияние разнообразных факторов на рассматриваемый параметр:

$$\begin{aligned} \lg PGV = & -2.12833 + 1.21448M - 0.08137M^2 - (2.46942 - \\ & - 0.22349M) \lg(R_{кр}^2 + 6.41443^2)^{1/2} + 0.20354S_S + 0.08484S_a - \\ & - 0.05856F_N + 0.01305F_R, \end{aligned} \quad (1.31)$$

где  $M$  – моментная магнитуда;

$R_{кр}$  – кратчайшее расстояние до плоскости разрыва;

$S_S$  и  $S_A$  – коэффициенты, отражающие грунтовые условия: они равны 1 для грунтов III ( $V_{S,30} < 360$  м/с) (soft) и II (stiff) категорий, для грунтов I категории (rock sites) ( $V_{S,30} > 750$  м/с) равны 0;

$F_N$  и  $F_R$  – коэффициенты, отражающие влияние механизма очага ( $F_N$  – сброс,  $F_R$  – взброс) и в соответствии с механизмом очага принимающие значение либо 1, либо 0.

Погрешность составляет 0.278. Диапазон рассматриваемых магнитуд от 5.0 до 7.6, расстояний - до 100 км.

Следует отметить, что в приведенной формуле, как и в некоторых других работах (см. например, [Frisenda et al., 2005; NGA-East..., 2015] и др.), содержится квадратичный член по магнитуде для лучшего соответствия затуханию эмпирических данных в дальней зоне. Однако необходимость такого члена далеко не очевидна. Например, Кэмпбелл и Бозоргия в работе [Campbell, Bozorgnia, 2006]

отказались от использования такого члена, мотивируя тем, что использование его неприемлемо для больших магнитуд. А в вышеупомянутой работе [Nguyen et al., 2012] авторы провели расчеты с использованием квадратичного члена по магнитуде и без него и не нашли значительных расхождений в результатах.

Разработанные различными авторами зависимости относятся как к прогнозу максимальной горизонтальной компоненты [Nekoeei, Babaei, 2016; Emolo et al., 2015; Bindi et al., 2010; Al-Qaryouti, 2008 и др.], так и к прогнозу средней (средней геометрической, средней арифметической и т.д.) горизонтальной компоненты [Akkar, Bommer, 2007, 2010; Bindi et al., 2014; Shoushtari et al., 2016; Anderson, Uchiyama, 2011; Danciu, Tselentis, 2007]. Предлагаются формулы и для уровня вертикальной компоненты [Campbell, 1997; Bozorgnia, Campbell, 2016; Stewart et al., 2016; Morikawa, Fujiwara, 2013 и др.]. В работе [Joyner, Fumal, 1984; Campbell, 1981; 1997] установлено, что средняя геометрическая горизонтальная компонента скорости на 17% по амплитудам меньше максимальной.

Анализ результатов разных авторов позволяет сделать вывод о том, что амплитуды скорости растут с ростом магнитуды и убывают с ростом расстояния. Причем эти закономерности универсальны и относятся к любым компонентам колебаний.

Стоит отметить, что поскольку параметр скорости имеет широкое применение в инженерной сейсмологии не напрямую, а в виде различных производных параметров, то в части работ выводятся уравнения именно для таких параметров, например, для кумулятивной скорости [Kostov, 2005; Campbell, Bozorgnia, 2010; Du, Wang, 2013; Foulser-Piggott, Goda, 2015].

### **1.3.2 Спектры скоростей колебаний грунта**

Как известно, построение спектров ускорений, используемых в практике сейсмостойкого строительства, часто производится в тройном логарифмическом масштабе с осями для ускорений, скоростей и смещений (см., например, [РБ-006-98; Standard..., 2014 и др.]). Кроме того, в ряде работ спектры скорости

применяются для решения задач по оценке сейсмической опасности и сейсмического микрорайонирования [Westermo et al., 1980; Trombetti et al., 2008; Chandradhara et al., 2011; Todorovska, Trifunac, 1996; Gupta, 2007; Lee et al., 2015 и др.]. Наибольший интерес при этом вызывают проблемы оценки спектральных ординат, иными словами, зависимости спектральных ординат от различных факторов.

В большинстве работ, посвященных изучению спектральных амплитуд скорости, рассматриваются горизонтальные компоненты колебаний. Однако есть ряд работ, в которых анализируется и вертикальная компонента [Todorovska, Trifunac, 1997; Das et al., 2002; 2006; Morasca et al., 2008; Lee et al., 1995; Lee, Trifunac, 1995; Lee, 2002; 2007; Gupta, Trifunac, 2018 и др.].

Сравнивая амплитуды на горизонтальной и вертикальной компоненте, авторы подчеркивают (см., например, [Gupta, Trifunac, 2018]), что горизонтальная компонента превышает вертикальную во всем диапазоне периодов, но с уменьшением периода это различие уменьшается. Однако численные оценки при этом не приводятся.

При установлении законов затухания исследуются взаимосвязи спектральных ординат с магнитудой, расстоянием и грунтовыми условиями в точке наблюдения. Как правило, вид функциональной зависимости задается заранее, а затем на основе имеющихся эмпирических данных ищутся аппроксимационные коэффициенты. Работы эти не столь многочисленны по сравнению с работами, посвященными спектрам ускорений, однако они столь же разнообразны по применяемым магнитудам (используются локальные магнитуды [Morasca et al., 2008; Bindi et al., 2006 и др.], магнитуды  $M_S$  [Manić, 2002; Das et al., 2002; 2006 и др.],  $M_W$  [Das, Gupta, 2010; Massa et al., 2008; Dhakal et al., 2008 и др.] или даже  $M_{JMA}$  [Shabestari, Yamazaki, 1998; 2000] и т.д.) и расстояниям (используется гипоцентральное [Ansary, 2014; Das et al., 2002; 2006; Schmidt et al., 1997 и др.], эпицентральное [Zonno, Montaldo, 2002; Massa et al., 2008; Lee, Manić, 1994; Lee, 1995 и др.], кратчайшее до разлома [Spudich et al., 1996, 1997; Pankow, Pechmann, 2004; 2006; Chou, Uang, 2000 и др.] и т.д.).

Так, в работе [Massa et al., 2008] для северной Италии разработано следующее уравнение для оценки спектральных амплитуд скорости на 14 периодах  $T$  в диапазоне от 0.04 с до 4.0 с:

$$\lg PSV(T) = a + bM + c \lg(R^2 + d^2)^{1/2} + s_1 S_A + s_2 S_{(B+C)} + \varepsilon, \quad (1.32)$$

где  $M$  – либо локальная  $M_L$ , либо моментная магнитуда  $M_W$ ,

$R$  – эпицентральный расстояние,

$S_A$  и  $S_{(B+C)}$  – члены, отражающие грунтовые условия в точке регистрации и принимающие значения 0 или 1: в случае скальных пород  $S_A = 1$  и  $S_{(B+C)} = 0$ , в остальных случаях  $S_A = 0$  и  $S_{(B+C)} = 1$ ;

$\varepsilon$  – погрешность,

$a, b, c, d, s_1, s_2$  – регрессионные коэффициенты, определяемые по эмпирическим данным для каждого периода.

В работе [Ansary, 2014] для района северо-восточной Индии предложено уравнение:

$$\lg PSV(T) = b_1 + b_2 r + b_3 M + b_4 \lg r, \quad (1.33)$$

где  $r$  – гипоцентральный расстояние;

$M$  – магнитуда;

$b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты, определяемые по эмпирическим данным для каждого периода.

Как видно, в приведенном уравнении отсутствует член, отражающий влияние грунта. Поправка за грунт вводится иначе: автор группирует данные, выделяя лишь 2 типа грунта (“rock” и “soil”), и для каждой группы определяет свои коэффициенты, получая соответственно 2 отдельных уравнения.

Прогнозное уравнение для северо-западных Балкан [Manić, 2002] имеет вид:

$$\lg PSV(T) = c_1(T) + c_2(T)M + c_3(T) \lg R + c_4(T)SA, \quad (1.34)$$

где  $M$  – магнитуда  $M_S$  или локальная  $M_L$ ;

$R$  – эпицентрального расстояние или кратчайшее до разлома;

$SA$  – грунтовый коэффициент,  $SA = 0$  для скальных грунтов  $V_{S,30} > 750$  м/с,  $SA = 1$  для средних (“stiff”) грунтов,  $360 < V_{S,30} \leq 750$  м/с;

$V_{S,30}$  – скорость поперечных волн в верхнем 30-метровом слое;

$c_1, c_2, c_3, c_4$  - коэффициенты, определяемые по эмпирическим данным для каждого периода.

При этом для каждого расстояния и каждой магнитуды выводятся отдельные уравнения.

Установлено, что с ростом магнитуды величина спектральных амплитуд возрастает, а с ростом расстояния – падает. Результаты исследований влияния грунтов приводят к выводу, что амплитуды на твердых грунтах меньше амплитуд на мягких грунтах. Стоит отметить, что в работе [Gupta, Trifunac, 2018] обнаружены и более сложные зависимости. Авторы указывают, что на коротких периодах (для исследуемого района меньше 0.24 с) амплитуды на участках, сложенных осадочными породами, самые маленькие, а самые большие – на коренных породах. Затем эта тенденция меняется на противоположную. Если же рассматривать влияние верхнего грунтового слоя, то, при прочих равных условиях, чем больше его толщина, тем больше спектральные амплитуды, хотя на коротких периодах (для района исследований 0.1 с) эта разница амплитуд пренебрежимо мала. Авторы объясняют это факт явлением неупругого затухания в мягких грунтах на коротких периодах.

В некоторых работах в уравнения затухания вводятся члены, учитывающие влияние на спектральные ординаты механизма очага (см., например, [Campbell,

1990; Crouse, McGuire, 1996; Spudich et al., 1999; Spudich, Boore, 2005 и др.]). В работе [Campbell, 1990] подобное уравнение имеет вид:

$$\ln PSV(T) = a + bM + d \ln(R + c_1 e^{c_2 M}) + eF + f_1 th(f_2(M + f_3)) + g_1 th(g_2 D) + h_1 K_1 + h_2 K_2 + h_3 K_3 + \varepsilon, \quad (1.35)$$

где  $M$  – магнитуда, причем для  $M < 6$  это – магнитуда  $M_L$ , а для  $M \geq 6$ , это – магнитуда  $M_S$ );

$R$  – расстояние до сейсмогенного разрыва в км,

$F$  – параметр, представляющий механизм очага,  $F = 0$  для сдвигов,  $F = 1$  для взбросов;

$D$  – мощность осадочного слоя (глубина залегания коренных пород) в км;

$K_i$  – параметры, представляющие воздействия на здания и равные:  $K_1 = 1$  – при рассмотрении заглубленных зданий от 3 до 11 этажей;  $K_2 = 1$  – для заглубленных зданий выше 11 этажей;  $K_3 = 1$  – для зданий выше 2 этажей, но не имеющих отрицательные этажи;  $K_1 = K_2 = K_3 = 0$  – во всех остальных случаях;

$\varepsilon$  – натуральный логарифм стандартного отклонения;

$a, b, c_i, d, e, F_1, f_i, g_i, h_i$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого из 15 периодов спектра в диапазоне от 0.04 с до 4.0 с.

В работах [Spudich et al., 1996, 1999; Spudich, Boore, 2005] авторы иначе исследуют влияния механизма очага: данные разбиваются на 2 группы соответственно – сейсмические события с механизмом сдвигового типа и с механизмом сбросового типа, а затем проводится их сравнительный анализ. Сделан вывод о том, что наблюдается различие в спектральных амплитудах, а именно амплитуды при сдвигах в среднем на 10% выше. По периодам отмеченное превышение распределяется по-разному: на коротких периодах спектральные амплитуды при сдвигах больше, чем при сбросах примерно на 25%, затем разница уменьшается и достигает своего минимума в районе 1 с, и, наконец, возрастает, достигая примерно 40% на больших периодах.

Группа сильных движений Университета Южной Калифорнии (Strong-Motion Group of the University of Southern California (USC), Los Angeles) предположила, что влияние механизма очага является определяющим для спектральных амплитуд фактором только вблизи очага. По их мнению, при распространении волнового фронта большое влияние на результирующие колебания имеют явления затухания, рассеивания, интерференции и т.п., т.е. пути распространения волны. Поэтому эта группа предложила (и развивает такую методику и в настоящее время) вместо члена, отражающего влияние механизма очага, вводить в рассмотрение путь распространения колебаний от очага до пункта регистрации [Lee et al., 1995; Lee, Trifunac, 1995; Lee, 2002; 2007]. При таком подходе различные варианты путей распространения волны могут быть разделены на 4 типа: 1) очаг землетрясения расположен в осадочном чехле, на поверхности которого располагается и регистрирующая станция; 2) очаг располагается в коренных скальных породах, регистрирующая станция - на осадочном чехле так, что колебания от очага подходят к этой станции почти вертикально; 3) этот тип подобен предыдущему с той лишь разницей, что очаг располагается близко к поверхности, и колебания подходят к станции, расположенной на осадочном слое или на выходе скальных пород, но вблизи осадочных отложений, почти горизонтально; 4) месторасположение и очага, и станции - скальные породы с линзами осадочных пород или без них. Учет же типа пути распространения реализуется вводом в уравнение затухания нового члена, представляющего собой отношение длины пути распространения волны через скальные породы основания к общей длине пути от очага до станции, измеренной по поверхности. Очевидно, что успешная реализация такого подхода возможна лишь в случае хорошего знания геологического строения среды на пути распространения. К тому же, сами формулы расчета амплитуд значительно усложняются. Например, для модели 2) формула имеет вид:

$$\lg PSV(T) = \begin{cases} M + A_0(T) \lg \frac{\Delta}{L} + b_1(T)M + b_2(T)s + b_3(T)v + \\ + b_4(T) + b_5(T)M^2 + \sum_i b_6^{(i)}(T)S_6^{(i)} + \\ + (b_{70}(T)r + b_{71}(T)(1-r))R, & R \leq R_{\max}, \\ M + A_0(T) \lg \frac{\Delta_{\max}}{L} + b_1(T)M + b_2(T)s + b_3(T)v + \\ + b_4(T) + b_5(T)M^2 + \\ + \sum_i b_6^{(i)}(T)S_6^{(i)} + (b_{70}(T)r + b_{71}(T)(1-r))R_{\max} - \\ - \frac{(R - R_{\max})}{200}, & R > R_{\max}, \end{cases} \quad (1.36)$$

$$\text{где } A_0(T) = \begin{cases} a + b \lg T + c(\lg T)^2, & T < 1.8 c \\ -0.732025, & T \geq 1.8 c \end{cases} \quad \text{- функция затухания амплитуд}$$

на периоде  $T$ , постоянные  $a$ ,  $b$  и  $c$  которой принимают значения  $a = -0.767$ ,  $b = 0.272$ ,  $c = -0.526$ ;

$$\Delta = S \left( \ln \frac{R^2 + H^2 + S^2}{R^2 + H^2 + S_0^2} \right) \quad \text{- расстояние от очага до станции}$$

по [Gusev, 1983], где  $R$  – эпицентральное расстояние,

$H$  – глубина очага,

$S = 0.2 + 8.51(M - 3)$  – размер очага землетрясения магнитуды  $M$ ,

$S_0 = c_S T / 2$  – радиус очаговой функции,  $c_S$  – скорость поперечных волн в породах, вмещающих очаг;

$\Delta_{\max}$  и  $R_{\max}$  – расстояния, за пределами которых функция затухания имеет наклон, определяемый шкалой локальных магнитуд Рихтера;

$L$ , км =  $L(M) = 0.01 \times 10^{0.5M}$  – параметр, моделирующий длину очага [Trifunac, 1993a, 1993b];

$s$  – параметр, отражающий грунтовые условия в точке регистрации в верхнем 100 – 200-метровом слое: 0 – для осадочных грунтов, 1 – для промежуточных, 2 – для скальных пород;

$S^i$  – параметр, отражающий среднюю скорость поперечных волн в верхнем 30-метровом слое в пункте регистрации;

$\nu$  - параметр, определяющий компоненту: 0 для горизонтальной компоненты, 1 – для вертикальной компоненты;

$r$  - отношение длины пути распространения волны через скальные породы основания к общей длине пути от очага до станции, измеренной по поверхности (может быть выражено в процентах)

$b_i$  – коэффициенты, определяемые эмпирически.

Работ по оценке различных параметров спектров скоростей или взаимосвязи между этими параметрами в зависимости от различных характеристик очага и среды крайне мало, см., например, [Михайлова, 1983; Ходжаев, 2011; Ходжаев, Клименко, 2012]. Связано это, видимо с тем, что априори считается, что все свойства спектров скоростей можно вывести, используя установленные корреляционные зависимости для ускорений или смещений, поскольку скорости, ускорения и смещения связаны, как известно, функционально (см., например [Kramer, 2009; Курбацкий, Баев, 2011; Trombetti et al., 2008 и др.]).

В связи с этим следует упомянуть работу [Mikhailova, Artikaev, 1996]. Авторы, изучая различные параметры сильных движений грунта, установили, что между значением максимума спектра (реакции) скорости и пиковым ускорением грунта существуют корреляционные соотношения вида:

$$\lg PSV_{\xi} = c_{\xi} + \lg PGV \pm \sigma, \quad (1.37)$$

где  $PSV$  – значение максимальной амплитуды спектра скорости;

$PGV$  – значение пикового ускорения грунта (на акселерограмме);

$\xi$  - уровень демпфирования спектра;

$c_{\xi}$  - постоянная, зависящая от уровня демпфирования спектра  $\xi$ ;

$\sigma$  - стандартное отклонение.

Для различных уровней демпфирования (от 0% до 20%) эти соотношения имеют вид:

$$\lg PSV_0 = 0.96 + \lg PGV \pm 0.13 \text{ при демпфировании } 0\%, \quad (1.38)$$

$$\lg PSV_2 = 0.65 + \lg PGV \pm 0.10 \text{ при демпфировании } 2\%, \quad (1.39)$$

$$\lg PSV_5 = 0.48 + \lg PGV \pm 0.10 \text{ при демпфировании } 5\%, \quad (1.40)$$

$$\lg PSV_{10} = 0.32 + \lg PGV \pm 0.08 \text{ при демпфировании } 10\%, \quad (1.41)$$

$$\lg PSV_{20} = 0.14 + \lg PGV \pm 0.08 \text{ при демпфировании } 20\%. \quad (1.42)$$

В работах [Аптикаев и др., 1976; Аптикаев и др., 1979 а, б; Аптикаев, Копничев, 1979; Аптикаев, Нерсесов, 1980; Сейсмическое..., 1980; Аптикаев, 1983] можно найти эмпирическую формулу, позволяющую оценить преобладающие периоды скоростей (получена она на основе данных Северного Тянь-Шаня и Калифорнии):

$$\lg T_V = 0.15 M_S + 0.25 \lg R - 1.5 \pm 0.16, \quad (1.43)$$

где  $T_V$  - преобладающий период скорости,

$M_S$  - магнитуда по поверхностным волнам,

$R$  – гипоцентрального расстояние.

Аналогичное соотношение для Газлийского района [Чернов, 1989] имеет вид:

$$\lg T = 0.32 M_S + 0.14 \lg R - 2.13 \pm 0.16. \quad (1.44)$$

Как видно, общий вид зависимости сохраняется, хотя значения коэффициентов разнятся, что обусловлено набором данных – при выводе последней формулы использовались данные одного района. Автор особо отмечает, что ближняя зона Газлийских землетрясений обладает характерной особенностью - независимостью периодов колебаний от расстояния.

Для Туркменистана в работе [Гарагозов, 1999] приводится следующее уравнение, также полученное при обработке эмпирических данных:

$$\lg T_V = 0.2 M_S + 0.25 \lg R - 2.2 \pm 0.25. \quad (1.45)$$

При применении другой методики обработки для того же района в работе [Ходжаев, 1999] приводится выражение, слегка отличающееся от формулы (1.45):

$$\lg T_V = 0.16 M + 0.26 \lg R - 1.62 \pm 0.39, \quad (1.46)$$

где  $R$  – эпицентрально-расстояние.

Как видно, приведенные два последних уравнений, полученные независимо, достаточно близки. Следовательно, сам результат можно считать довольно устойчивым.

Анализ указанных соотношений приводит к выводу о том, что преобладающий период скоростей вне зависимости от рассматриваемых данных, районов и методов обработки растет с увеличением магнитуды и расстояния. Разницу же в числовых коэффициентах, свободных членах и стандартных отклонениях можно отнести за счет неучтенных факторов, прежде всего таких, как механизмы очага, грунтовые условия. Кроме того, в эмпирические выборки попадают данные как из ближней, так и из дальней зон в различных пропорциях.

При анализе средней формы спектров ускорений в работе [Аптикаев, Эртелева, 2008a] было установлено, что при  $T = 2.7 T_0$  на длиннопериодном склоне спектра ускорений наблюдается излом. Появление этой точки было

объяснено тем, что в среднем преобладающий период колебаний на велосиграмме в 2.7 раза превышает преобладающий период на акселерограмме.

### 1.3.3 Продолжительность сейсмических колебаний в скоростях

Работ по исследованию продолжительности колебаний в скоростях практически нет в отличие от работ по такой же тематике, но для ускорений. Можно привести лишь несколько эмпирических соотношений, полученных при обработке данных из относительно компактных районов.

Так, после Газлийских землетрясений 1984 г. Ю.К.Чернов (1989) для Газлийского района получил следующее соотношение:

$$\lg \tau_{V, 0.3} = 0.22 M_S + 0.95 \lg R - 2.11 \pm 0.20, \quad (1.47)$$

где  $\tau_{V, 0.3}$  – продолжительность колебаний в скоростях, измеренная на уровне 0.3 от максимальной амплитуды.

В более поздней работе [Гарагозов, 1999] для Туркменистана на основе анализа эмпирических данных по сильным движениям грунта приводится выражение:

$$\lg \tau_V = 0.2 M_S + 0.5 \lg R - 1.2 \pm 0.22. \quad (1.48)$$

Близкий результат для Туркмении был получен и в работе [Ходжаев, 1999]:

$$\lg \tau_V = 0.18 M_S + 0.5 \lg R - 0.75 \pm 0.59. \quad (1.49)$$

Как видим, продолжительность колебаний для скоростей определяется магнитудой и расстоянием, причем более значительно влияние фактора расстояния.

## 1.4 Выводы

Анализ литературных данных показал, что на сегодняшний день признанным является тот факт, что 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.

Исследования последних лет показали, что ближняя зона обладает рядом характерных особенностей относительно распространения сейсмического волнового фронта, и многие принятые теоретические представления опровергаются накопленными эмпирическими данными.

Изучению этих особенностей посвящены многочисленные работы, в которых предлагаются соотношения между количественными параметрами сейсмических колебаний и параметрами очагов и среды.

Наиболее популярным и хорошо исследованным параметром является ускорение. Разработаны разнообразные уравнения затухания, установлены зависимости параметров записи и спектра от характеристик среды и очага, исследуется 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.

В мировой практике наблюдается резкое повышение интереса к скорости колебаний грунта. Однако этот параметр еще мало исследован. Основная масса работ посвящена уравнениям затухания скоростей. В то же самое время исследования отдельных характеристик этого параметра сейсмических колебаний практически отсутствуют, что сдерживает практику использования скоростей в инженерных задачах.

Все это снижает качество прогноза ожидаемых количественных характеристик сейсмических колебаний, крайне необходимых не только для решения научных задач при исследовании процессов в очаге землетрясения, но и в теории и практике сейсмостойкого строительства.

Постановка задач диссертации. Проведенный анализ литературных данных приводит к выводу о том, 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 скоростей 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 спектры 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.

Необходимо особо отметить, что все устанавливаемые корреляционные уравнения должны сопровождаться оценкой стандартного отклонения для определения доверительного уровня таких соотношений.

## **Глава 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

Итогом исследований количественных параметров сейсмического колебания грунта является возможность их прогнозирования при оценке сейсмических воздействий. Прогноз параметров сильных движений грунта – важная составная часть работ по оценке сейсмической опасности, которая дает входные данные для решения задач сейсмостойкого строительства (см., например, [Извайлов и др., 2017]). Сами же прогнозные соотношения могут быть получены разнообразными способами, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. Выбор того или иного метода тесно связан с имеющимися первичными данными и методикой их обработки.

### **2.1 Классификация методов прогноза параметров сейсмических колебаний**

Существующие сегодня разнообразные методы оценки параметров сейсмических колебаний при назначении сейсмических воздействий могут быть разделены на 4 основные группы (см. например, [Аптикаев, Эртелева, 2012; Erteleva, 2011]):

- Использование макросейсмических данных по прошлым землетрясениям с последующим пересчетом полученных оценок в ожидаемые параметры сейсмического движения грунта по корреляционным соотношениям между интенсивностью и параметрами колебаний (по инструментальной шкале сейсмической интенсивности).
- Использование записей сильных движений грунта, полученных непосредственно на площадке строительства или в сходных сейсмогеологических условиях.
- Модельные расчеты с использованием различных моделей очага и среды.
- Статистические оценки параметров сильных движений грунта по эмпирическим данным.

Достоинства и недостатки этих методов подробно рассматриваются в следующем разделе.

### **2.1.1 Использование инструментальной шкалы сейсмической интенсивности**

Исторические сведения о землетрясениях прошлого играют весьма важную роль при оценке сейсмической опасности, поскольку период макросейсмических наблюдений намного больше периода инструментальных наблюдений. К макросейсмическим данным можно отнести и результаты исследований палеоземлетрясений, что еще больше увеличивает временной интервал. Действующие карты сейсмического районирования в России оценивают сейсмическую опасность в баллах шкалы интенсивности.

Для конкретного объекта метод имеет то преимущество, что повторяемость интенсивности определяется довольно точно, поскольку для происшедших землетрясений не требуется оценивать магнитуды, типы подвижек в очагах, расстояния до зон ВОЗ, затухание интенсивности, а обрабатываются данные о сейсмических эффектах на площадке объекта. Данный метод предполагает однозначность соответствия макросейсмических и инструментальных оценок и реализуется с помощью инструментальных шкал сейсмической интенсивности [Sandi et al., 2010; Guan et al., 2011; Нестерова и др., 2018 и др.]. Сейсмический эффект землетрясения представлен в описательных характеристиках последствий землетрясений, концентрированным выражением которых является балл шкалы.

Недостатком метода является неоднозначность связи между сейсмической интенсивностью и ускорением грунта. Если параметры движения грунта однозначно определяют сейсмическую интенсивность, то обратный переход неоднозначен, поскольку амплитуда колебаний является не единственным фактором, определяющим сейсмическое воздействие.

Соотношение ускорение - интенсивность зависит от расстояния и категории грунта [Neumann, 1954; Murphy, O'Brien, 1978;. Аптикаев, 2012]. Одинаковой интенсивности может соответствовать как высокий уровень ускорения, очень

высокие частоты и весьма малая продолжительность колебаний от близкого землетрясения с малой магнитудой, так и низкий уровень ускорения, низкие частоты и очень большая продолжительность колебания при мощных, но удаленных землетрясениях. Влияние продолжительности колебаний, увеличивающейся с расстоянием и на рыхлых грунтах, частично учитывается в нормах Eurocode 8 (2002).

Прогноз воздействий с использованием инструментальных шкал связан с еще одной проблемой – точностью определения уровня пикового ускорения грунта. В настоящее время в мире получен представительный материал по сильным движениям грунта, который с убедительностью показывает, что уровень колебаний при сильных землетрясениях выше, чем это предполагалось ранее [Wald et al., 1999; Шебалин, Аптикаев, 2003; Aptikaev, 2009; и др.]. Кроме того, в инженерной практике пока используются не реальные ускорения грунта, а так называемые “эффективные ускорения”, соответствующие относительно малым периодам (около 0.2 с). В работе [Медведев, 1978] отмечается, что уровень ускорений в шкале MSK-64, где используются эффективные ускорения, примерно в полтора раза ниже реальных. Пренебрежение низкими частотами и делает шкалу MSK-64 непригодной для расчета многоэтажных зданий и других объектов с большими периодами собственных колебаний.

Значения интенсивности на картах общего сейсмического районирования округляются до целочисленных значений. Реальная точность оценок интенсивности в инженерном диапазоне, как правило, не хуже 0.4 балла [Шебалин, Аптикаев, 2003]. Изолинии сейсмической интенсивности при детальном сейсмическом районировании также рекомендуется проводить через 0.5 балла [Аптикаев и др., 1986]. Округление оценок сейсмической интенсивности до целочисленных значений – одна из причин ошибок при оценке сейсмической опасности и назначении сейсмических воздействий. Часто при обработке эмпирических данных явно или неявно предполагается случайный характер выборки данных. Из сейсмологического закона повторяемости землетрясений следует, что для каждой интенсивности  $I \pm 0.5$  количество записей на границах

интервала различается примерно в три раза. Поэтому “средняя” оценка ускорения, соответствующего данной интенсивности, оказывается смещенной в сторону более слабых воздействий. Примером тенденциозности подборки исходных данных является потеря части данных вследствие высокого порога срабатывания аппаратуры, или отсутствия слабых землетрясений в библиотеке данных, поскольку они неинтересны для инженеров-проектировщиков [Trifunac, Brady, 1976].

### **2.1.2 Использование реальных записей, полученных непосредственно на исследуемой площадке или в сходных сейсмогеологических условиях**

Эта группа методов зачастую преподносится как наиболее желаемая и точная на первый взгляд, см., например, СП 14.13330.2018. Но всегда ли мы имеем записи на площадке, да еще и интересующей нас магнитуды? Нет. Если же попытаться использовать запись, полученную в сходных условиях (которые очевидно не повторяют локальные в точности), то ее необходимо при помощи различных теоретических предположений привести к местным условиям, что также не повышает точности результатов. Итак, в эту группу входят следующие методики:

- оценка параметров сейсмических воздействий на основе записей местных землетрясений. Использование данной методики возможно лишь при наличии густой сети станций сильных движений и продолжительного срока наблюдений. Однако даже наличие местной акселерограммы не гарантирует того, что параметры сейсмического движения грунта при ожидаемом землетрясении совпадут с таковыми для имеющейся записи. Кроме того, следует иметь в виду, что законы масштабирования акселерограмм различны в ближней и дальней зонах [Аптикаев, 1969; Аптикаев, Эртелева, 2014]. В рекомендациях Eurocode 8 (2002) рекомендуется строить огибающую многих спектров записей и по получившемуся спектру строить синтетическую акселерограмму. Такой способ используется, например, в строительных нормах штата Калифорния. Возможные

ошибки могут быть связаны с несовершенством примененных методов обработки исходных данных;

- подбор реальных записей, полученных в сходных сейсмогеологических условиях. Такими условиями являются интенсивность, магнитуда землетрясений, тип подвижки в очаге, расстояние до проектируемого объекта, грунтовые условия на строительной площадке. Однако существуют и другие локальные особенности очагов и среды, оценить которые можно только эмпирическим путем. Недостатки этого способа такие же, как и при использовании записей местных землетрясений, но погрешность расчетов увеличивает дисперсию оценок примерно на 35%;

- совместная обработка множества реальных акселерограмм и построение обобщенного спектра, учитывающего особенности каждой отдельной реализации. Такие спектры приводятся в любых строительных нормах. Считается, что обобщенный спектр учитывает все магнитуды и все расстояния. И уже на основании обобщенных спектров строятся синтетические акселерограммы. Однако простое сравнение показывает, что каждый новый вариант СП существенно отличается от предыдущих, а о различиях между строительными нормами разных стран и говорить не приходится. Разногласия в обобщенных спектрах возникают не столько по причине различий в сейсмогеологических условиях разных регионов, сколько в ошибках при статистической обработке записей сильных движений и в ряде допущений, которые оказываются неверными. Например, в соответствии с законом повторяемости, землетрясения с магнитудой  $M = 8$  происходят примерно в 1000 раз реже, чем землетрясения с магнитудой  $M = 5$ . Поэтому обобщенный спектр больше соответствует малым магнитудам. Поскольку с течением времени накапливается большое количество записей землетрясений с большими магнитудами, которые обрабатываются индивидуально, наблюдается тенденция расширения обобщенных спектров в низкочастотную область.

Другим проявлением предположения о случайности выборки исходных данных является появление максимумов в обобщенных спектрах. По-видимому, этим объясняется появление максимума в обобщенном спектре американских

норм USNRC R.G. 1.60 [Standard..., 2014]. Согласно этому спектру все землетрясения независимо от магнитуды и расстояния имеют максимальный уровень спектра ускорения на частоте 2.5 Гц, хотя по эмпирическим данным известно, что преобладающие периоды зависят от магнитуды, механизма очага, расстояния и грунтовых условий в пункте наблюдений.

При обработке реальных акселерограмм для построения обобщенных спектров возникает ошибка, связанная с осреднением уровней отдельных спектров на каждой из частот. Легко видеть, что при этом занижается уровень “среднего” спектра, а полоса частот расплывается.

### **2.1.3 Расчеты с использованием моделей очага землетрясения**

Теоретические соотношения основываются на решении упрощенного волнового уравнения. Модельные расчеты в настоящее время очень популярны. И потому что разработано множество моделей очага [Anderson, Richards, 1975; Boore, 2005; Гусев, 1988; Грайзер, Эртелева, 1991; Haskell, 1969; Joshi et al., 1999; Midorikawa, 1993; Joshi, 2004; Pavlenko, Irikura, 2003 и др.], и потому что для реализации таких методик не требуется проведения дорогостоящих полевых работ. Достаточно даже материалов общего сейсмического районирования, карты разломов и т.п. Но оценки точности модельных расчетов, как правило, не приводятся. Да это и естественно: ведь изначально такие методы разрабатывались не для прогноза воздействий, а, наоборот, для построения модели очага произошедшего землетрясения по имеющимся в ближнем от него окружении записям. Модель считается наилучшей, если для одного и того же пункта зарегистрированные и синтезированные сейсмограммы максимально совпадают. При этом желательно иметь несколько записей этого землетрясения на станциях, окружающих эпицентр. Использование теоретических моделей при изучении очага конкретного землетрясения и его ближней зоны дает хорошие результаты.

Однако при использовании моделей для прогнозирования воздействий мы заведомо вкладываем в наши расчеты неточности в моделировании строения

среды; неточности в моделировании самого очага и его параметров, незнание пути распространения сейсмических волн, неверные предположения об идентичности законов формирования спектра в ближней и дальней зонах и т.п. Условие успешной реализации модельных расчетов - наличие записей слабых местных землетрясений, на основании которых могут быть оценены параметры прогнозируемого землетрясения. Однако условие это в большинстве случаев не может быть реализовано. К тому же, современные формулы расчета пиковых ускорений грунта на основании эмпирических данных и аппроксимирующих формул дают лучшие результаты, да еще и с оценкой их точности [Seismological..., 1997 и др.].

Существующие теоретические модели слишком упрощены. Считается, что сейсмическая энергия излучается плоскостью разрыва, а не некоторым объемом, вмещающим разрыв. В существующих моделях не учитываются некоторые нелинейные эффекты, например, зависимость частотного состава сейсмических колебаний от уровня колебаний. Считается, во-первых, что сейсмические колебания с увеличением расстояния обедняются высокими частотами и, во-вторых, добротность среды не зависит от уровня колебаний. Но теоретическими расчетами было показано, а эмпирическими данными подтверждено, что при интенсивных колебаниях возникают нелинейные процессы, в результате которых сейсмические колебания обогащаются частотами, которых не было в исходном сигнале, см., например, [Павленко, 2009]. В работах [Аптикаев, 1969; 1999] приведены результаты эмпирических наблюдений и проведены теоретические расчеты, показывающие, что в поглощающей среде наблюдаются нелинейные явления, а именно:

- поглощение линейно зависит от уровня колебаний;
- появляется постоянная составляющая, пропорциональная квадрату амплитуды колебаний и обратно пропорциональная квадрату скорости распространения волны;
- появляется вторая гармоника, уровень которой также пропорционален квадрату амплитуды колебаний и обратно пропорционален квадрату

скорости распространения волны. Эта гармоника, в свою очередь, приведет к появлению гармоник более высоких порядков;

- появляются комбинационные частоты, уровень которых пропорционален произведению амплитуд исходных тонов и обратно пропорционален квадрату скорости распространения волны;
- нелинейные эффекты существенно зависят от уровня амплитуды колебаний, поэтому приращение сейсмической интенсивности в конкретных грунтовых условиях может быть различным в зависимости от величины интенсивности;
- нелинейные эффекты, с которыми связано повышение сейсмической интенсивности, особенно велики на рыхлых грунтах (квадратичная зависимость от скорости распространения волн). Поэтому не следует связывать приращение балльности только с линейным увеличением уровня амплитуды колебаний.

Заметим, что рассмотренные нелинейные эффекты связаны только с наличием поглощения и рассеивания. При высоких значениях амплитуды имеются и другие факторы, вызывающие аналогичные явления, например, зависимость скорости распространения волны от уровня колебаний или отклонение закона деформирования от линейного [Аптикаев, 1969].

В одной из модификаций модельных методов для повышения надежности генерируется несколько десятков синтетических акселерограмм, и расчетный спектр получают осреднением уровней отдельных спектров на каждой из частот. При этом так же, как и при построении обобщенного спектра с использованием реальных записей, возникают значительные погрешности при оценке ожидаемого спектра - расползание спектра и снижение его уровня. Между тем, обработка эмпирического материала показала [Аптикаев, Erteleva, 2008], что значение логарифмической ширины спектров реакции весьма стабильно, что вполне понятно, поскольку эта величина безразмерна. Кроме того, расширение спектра ведет к увеличению продолжительности колебаний.

Другой разновидностью модельных методов, довольно популярной в инженерных расчетах [Уздин и др., 1993; Чернов, 1984], является метод, при использовании которого один из важнейших параметров, резонансная частота сейсмических колебаний, считается равным собственной частоте сооружения. Остальные параметры подбираются по тем или иным соображениям. Этот метод наиболее надежный, но и наиболее дорогостоящий. Следует иметь в виду, что собственный период построенного объекта в общем случае отличается от расчетного. С течением времени собственный период сооружения также изменяется. Сооружение может иметь несколько резонансов. Наконец, иногда определить резонансный период сооружения с демпфирующими устройствами затруднительно. Принимаемые к расчету сейсмические воздействия консервативны, но при этом далеки от реальных. Этот метод имеет наибольшую погрешность по сравнению с другими методами.

#### **2.1.4 Статистические оценки параметров колебаний**

Наконец, рассмотрим последнюю группу методов прогноза сейсмических воздействий, основанную на использовании статистических оценок параметров колебаний, как правило, в виде различных корреляционных соотношений между параметрами воздействиям и параметрами очага и среды. Методы этой группы можно разделить на теоретические, полуэмпирические и эмпирические.

Теоретические уравнения основаны на физических законах распространения сейсмических волн. Они описывают изменения амплитуды колебаний в виде зависимости ее от магнитуды и расстояния с учетом геометрического расхождения и поглощения. При этом коэффициенты уравнений определяются эмпирически для каждого района.

При полуэмпирическом методе эмпирическим путем подбираются коэффициенты для заранее выбранного математического выражения, коэффициенты которого оцениваются на основании наилучшего соответствия эмпирическим данным.

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, типам подвижки по разлому, расстояниям и грунтовым условиям. Отсутствие каких-либо допущений и предположений уменьшает ошибки прогноза и позволяет получить новые результаты, иногда неожиданные. Например, оказалось, что с удалением от поверхности разлома амплитуда ускорения начинает возрастать, а затем медленно спадать [Артикаев, Эртелева, 2007; Graizer, Kalkan, 2007; 2011]. Значения коэффициентов, полученные в различных регионах, очень стабильны.

Важнейшим достоинством метода является оценка среднеквадратичного отклонения для любого параметра колебаний.

При использовании этого метода мы заранее вкладываем в прогнозируемое воздействие все возможное естественное многообразие параметров среды и очага, их возможные вариации. Естественно, что чем более обширную базу данных мы используем, тем шире класс вариаций мы можем охватить, тем точнее наш прогноз. При этом ошибки в прогнозировании отдельных параметров заранее известны. Используя разработанные корреляции, можно задать воздействия с любой заранее заданной точностью, т.е. любым уровнем не превышения по различным параметрам. Последнее обстоятельство является большим преимуществом при использовании этой группы методов. При наличии записей местных землетрясений величина стандартных отклонений существенно уменьшается [Махдавиан и др., 2005].

Наибольшей погрешностью обладают теоретические формулы ( $\sigma(PGA) \approx 0.3$  ед. дес. логарифма), в то время как современные полуэмпирические формулы имеют ошибку  $\sigma(PGA) \approx 0.25$  ед. дес. логарифма [Kuk, 1989], а ошибка эмпирических формул составляет всего лишь  $\sigma(PGA) \approx 0.17$  ед. десятичного логарифма [Артикаев, Эртелева, 2012].

## 2.2 Изучаемые параметры сейсмического движения грунта

В представляемой работе использовался метод прогноза количественных параметров сейсмических воздействий [Артикаев, Erteleva, 2005; Эртелева, 2015], основанный на параметризации сейсмических записей.

К количественным характеристикам, с помощью которых описывается сейсмический эффект землетрясения, можно отнести ускорения, скорости, смещения колебаний грунта при землетрясении, которые могут быть исследованы по записям приборов, регистрирующих сейсмические колебания. Но изучать процесс колебаний при землетрясениях можно, не описывая детально, во всех мелочах, сейсмическую запись. Гораздо проще и, заметим, эффективнее применить метод параметризации, т.е. рассмотреть отдельные характеристики записей и выбрать из них те, с помощью которых можно описать особенности сейсмических колебаний [Артикаев, 1981, 1983; Vommer et al., 2009].

При этом изучать можно самые различные параметры сейсмической записи, но следует учесть, что часть из них будет коррелировать друг с другом, часть из них не будет нести информации, важной с точки зрения изучаемого процесса. Например, пиковое ускорение грунта и максимальный уровень спектра реакции коррелируют между собой с коэффициентом 0.94 [Mikhailova, Artikaev, 1996; Artikaev et al., 2007; Artikaev, Erteleva, 2008], а видимый период записи движения тесно коррелируется с преобладающим периодом спектра. Сами же эти закономерности могут быть записаны с использованием одних и тех же независимых переменных, которые и следует принять в качестве основных параметров движения грунта при землетрясении.

Следуя работам [Артикаев, 1981, 1983; Артикаев, 1985], будем применять следующие принципы параметризации физических процессов:

- параметры должны быть важными для изучаемого процесса;
- параметры должны быть попарно независимыми в том смысле, что изменение в расчетах любого параметра не должно вызывать существенных изменений других параметров;

- рекомендуется использование безразмерных параметров, которые по определению не зависят от масштабов явления.

### 2.2.1 Параметризация сейсмических записей

Для сейсмических процессов в [Аптикаев, 1981] предложены следующие три параметра: амплитуда, время и продолжительность колебаний.

При исследовании ускорений сейсмического движения грунта в качестве главных независимых параметров могут быть приняты [Аптикаев, Эртелева, 2005 а, б; 2012]:

- $PGA$  – максимальная амплитуда, характеризующая уровень сигнала, т.е. пиковое ускорение грунта;
- $T$  – преобладающий период (или преобладающая частота  $f_0$ ), соответствующий максимуму спектра реакции;
- $\tau$  – продолжительность или ширина импульса - временной интервал, когда выполняется условие  $PGA_{огиб} \geq 0.5 PGA$ .

Пиковая амплитуда движения и продолжительность характеризуют сейсмический процесс во временной области, а преобладающая частота есть характеристика частотного состава колебаний, особенности которой исследуются при изучении спектрального состава колебательного процесса.

Аналогичные выкладки были проведены для скоростей. В качестве главных независимых параметров были приняты:

- $PGV$  – пиковая скорость грунта;
- $T_0$  - преобладающий период (или частота) скорости;
- $\tau_V$  – продолжительность колебаний (или ширина импульса) в скоростях.

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

Стоит отметить, что и преобладающий период и продолжительность колебаний имеют одинаковую размерность времени. Из имеющихся эмпирических оценок для преобладающих периодов  $T$  и продолжительности колебаний  $\tau$  можем получить независимую 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.

В работе [Махдавиан и др., 2005; Aptikaev, Erteleva, 2008] установлено:

$$\lg \tau = 0.15 M_S + 0.5 \lg R + C_S + C_G - 1.3, \quad (2.1)$$

где  $M_S$  – магнитуда,

$R$  – гипоцентральное расстояние,

$C_S$  – коэффициент, учитывающий механизм очага,  $C_S = -0.25$  для взбросов, 0.00 для сдвигов и 0.25 для сбросов;

$C_G$  – коэффициент, учитывающий категорию грунта;  $C_G = -0.15$  для грунтов I категории, 0.00 для грунтов II категории и 0.4 для грунтов III и IV категорий.

С другой стороны, см. [Махдавиан и др., 2005; Aptikaev, Erteleva, 2008]:

$$\lg T = 0.15 M_S + 0.25 \lg R - \lg v_P + C - 1.11, \quad (2.2)$$

где  $v_P$  – скорость распространения продольных волн на глубине очага,

$C$  – постоянная, зависящая от механизма очага,  $C = -0.10$  для взбросов,  $C = 0.00$  для сдвигов,  $C = 0.10$  для сбросов.

Хотя максимальные амплитуды связаны, как правило, не с продольными, а с поперечными волнами, на практике обычно известны более точные оценки

именно продольных волн (сейсморазведка и ГСЗ). Соотношение же скоростей этих типов волн вне зоны малых скоростей довольно стабильно.

Из этих выражений получаем:

$$\lg n = 0.25 \lg R + C_S + C_G + \lg v_P - 0.19, \quad (2.3)$$

где  $C_S = -0.15$  для взбросов,  $0.00$  для сдвигов и  $+0.15$  для сбросов,

$C_G$  – постоянная, отражающая влияние грунтов:  $C_G = -0.10$  для грунтов I категории,  $C_G = 0.00$  для грунтов II категории и  $C_G = 0.40$  для грунтов III и IV категорий.

Для перехода к  $\tau$  имеем:

$$\tau = nT. \quad (2.4)$$

Следовательно, при необходимости существует возможность обойтись без исследований продолжительности колебаний, заменив ее исследованием количества циклов.

### 2.2.2 Параметризация спектра реакции

Подобная процедура – параметризация - может быть применена и к спектру реакции. Такая методика успешно применялась при изучении спектров реакции в ускорениях, например, [Махдавиан и др., 2005; Аптикаев, Эртелева, 2008а].

Какие же параметры могут быть приняты в качестве опорных?

Во-первых, очевидно, что любой спектр как частотная характеристика сейсмического процесса, во многом определяется преобладающей частотой (или, что то же самое, периодом) колебаний.

Во-вторых, важной характеристикой спектра является ширина полосы частот в области низких и высоких частот по отношению к преобладающей частоте.

В-третьих, коэффициент динамического усиления, показывает усиление амплитуды по сравнению с уровнем входного сигнала.

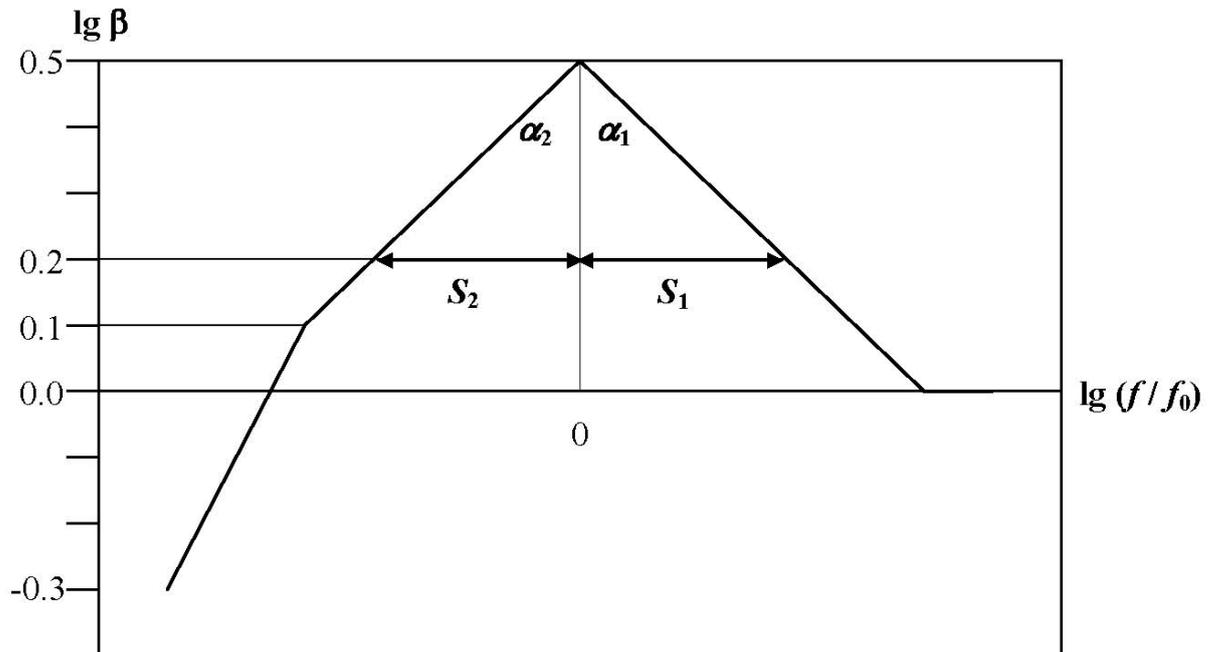
В-четвертых, важнейшей характеристикой является, максимальный уровень спектральной амплитуды или максимальной амплитуды колебаний грунта.

Отметим, что здесь и далее речь идет о спектрах реакции. Спектры Фурье, как известно, тесно коррелируются со спектрами реакции [Trifunac, 2003; Chopra, 2007; Курбацкий, Баев, 2011]. Кроме того, следует иметь в виду, что спектр Фурье не физическая, а математическая величина. Например, является ли такой спектр широкополосным или узкополосным, если его ширина 1 Гц? Очевидно, ответ будет разным при преобладающей частоте 100 Гц и 0.1 Гц.

Нормализуем спектры по преобладающему периоду и максимальной спектральной амплитуде. Тогда, все полученные в результате спектры будут различаться только формой, которую в первом приближении можно охарактеризовать логарифмической шириной спектра [Артикаев, 1985; Артикаев, Эртелева, 2001; Артикаев, Михайлова, 1985; Артикаев, 2012; Эртелева и др., 2011 и др.]. Для нашей задачи удобно измерять ширину спектра на уровне 0.5 от максимального.

Нормированный спектр, как величина безразмерная, не зависит от масштабов явления (в данном случае, магнитуды землетрясения). Вместе с тем, нормированные спектры могут различаться по ширине и коэффициенту динамического усиления в зависимости от местных очаговых и грунтовых условий. Появляется возможность сравнивать спектры по форме и установить среднюю форму спектра. Стоит отметить, что последняя будет наиболее простой в том случае, когда используется двойной логарифмический масштаб (т.е. и ось абсцисс - периодов, и ось ординат – спектральных амплитуд изображаются в логарифмическом масштабе).

Итак, как следует из изложенного выше, следующие величины можно принять за основные параметры нормализованного спектра, если отсчет производить от уровня входного сигнала (рисунок 2.1):



$S_1$  – высокочастотная,  $S_2$  низкочастотная части спектра;

$S = S_1 + S_2$  – логарифмическая ширина спектра;  $f_0$  – преобладающая частота колебаний;  $\beta$  – коэффициент динамического усиления;  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы между вертикалью и высоко- и низкочастотными склонами спектра. Уровень спектра и преобладающая частота определяются отдельно по эмпирическим соотношениям [Аптикаев, Эртелева, 2001; Аптикаев, Erteleva, 2008; Эртелева и др., 2011]

Рисунок 2.1 – Схема параметризации спектра

– максимальный спектральный уровень, который характеризуется коэффициентом динамического усиления  $\beta$ ;

– логарифмическую полуширину спектра  $S_2$  в области низких (по отношению к преобладающей) частот на разных уровнях от максимального (в спектре);

– логарифмическую полуширину спектра  $S_1$  в области высоких (по отношению к преобладающей) частот на разных уровнях от максимального (в спектре).

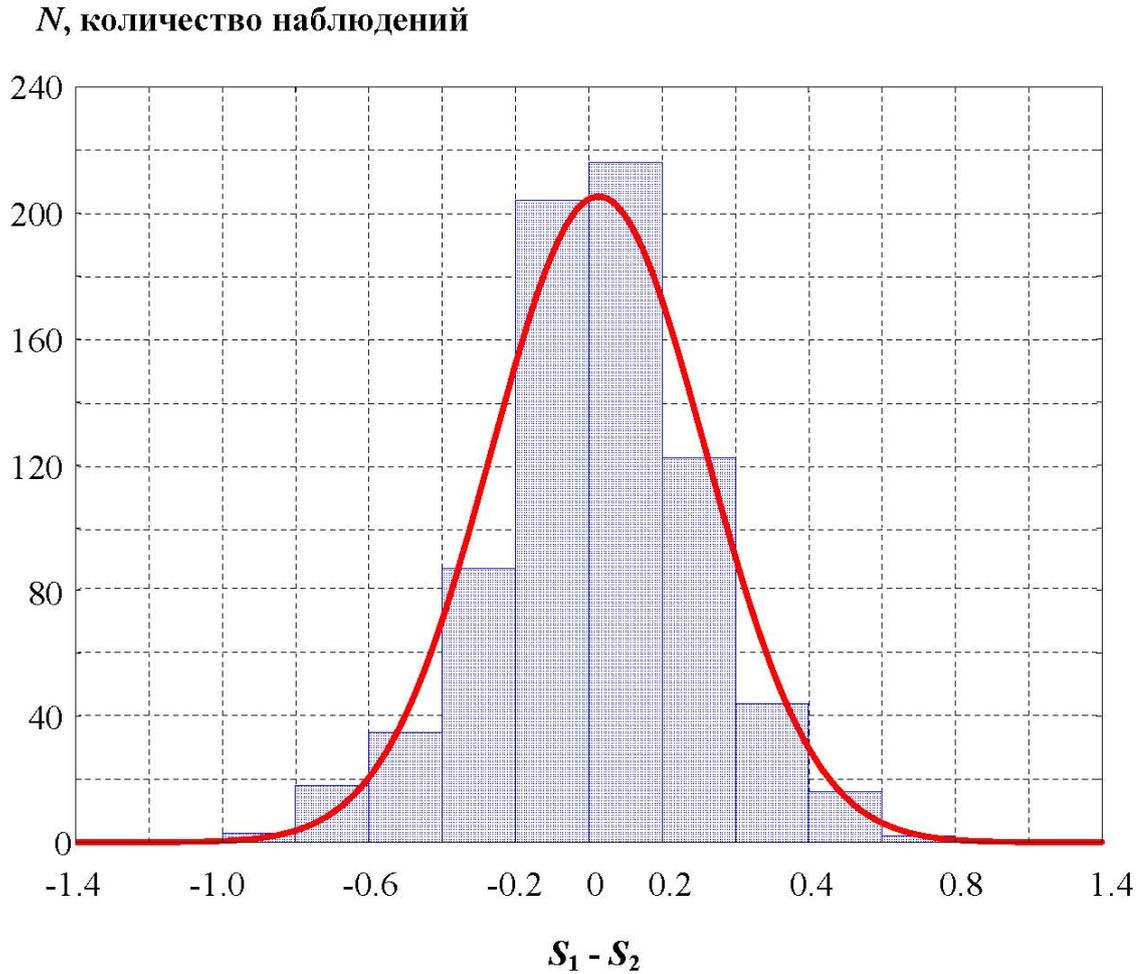
Сумма  $S = S_1 + S_2$  называется логарифмической шириной спектра и описывает полный частотный состав спектра. Оценим эту важную характеристику спектра [Аптикаев, 1981]. Найдем на спектре точки, лежащие справа и слева от преобладающей частоты  $f_0$ , ординаты которых равны, например, половине максимальной амплитуды спектра ( $0.5 SA_{\text{макс}}$ ) и обозначим их  $f_{вч}$  и  $f_{нч}$ . Тогда, величина  $\lg f_{вч} - \lg f_0$  (обозначим ее  $S_1$ ) и будет являться характеристикой частотного состава спектра в области высоких (по отношению к преобладающей) частот на уровне 0.5 от максимального спектрального, и, аналогично, величина  $\lg f_0 - \lg f_{нч}$  (обозначим ее  $S_2$ ) будет являться характеристикой частотного состава спектра в области низких (по отношению к преобладающей) частот. Тогда логарифмическая ширина спектра  $S = S_1 + S_2$  опишет полный частотный состав спектра на выбранном уровне 0.5 от максимального. Заметим, что совершенно аналогично можно определить логарифмическую ширину спектра на любом другом интересующем нас уровне (0.3, 0.4, 0.7 от максимального и т.д.).

В работе [Аптикаев, Эртелева, 2008а] с использованием 748 спектров горизонтальных компонент с 5% затуханием было построено эмпирическое распределение разности полосы частот по обе стороны от преобладающей частоты, аппроксимированное распределением Гаусса (рисунок 2.2).

Огибающая распределения имеет вид:

$$S_1 - S_2 = 0.02 \pm 0.27 \quad (2.5)$$

Следовательно, в среднем разность значений  $S_1$  и  $S_2$  незначительна, и спектры реакции ускорений можно рассматривать как симметричные относительно преобладающего периода. Следует отметить, что близкие оценки были получены и в работах [Аптикаев, Михайлова, 1985; Аптикаев, Эртелева, 2001] с использованием различных выборок данных сильных движений, что



Красная линия - распределение Гаусса с параметрами  $0.02 \pm 0.27$

Рисунок 2.2 - Распределение разности  $S_1 - S_2$ .

свидетельствует об устойчивости результата. При этом можно определять  $f_0$  как

$$f_0 = (f_{вч} * f_{нч})^{0.5}. \quad (2.6)$$

Такое определение заметно снижает стандартное отклонение.

Принимая во внимание симметричность спектров в двойном логарифмическом масштабе, частотный состав спектра реакции ускорений можно охарактеризовать логарифмической шириной спектра  $S$ . Распределение этой величины показано на рисунке 2.3.

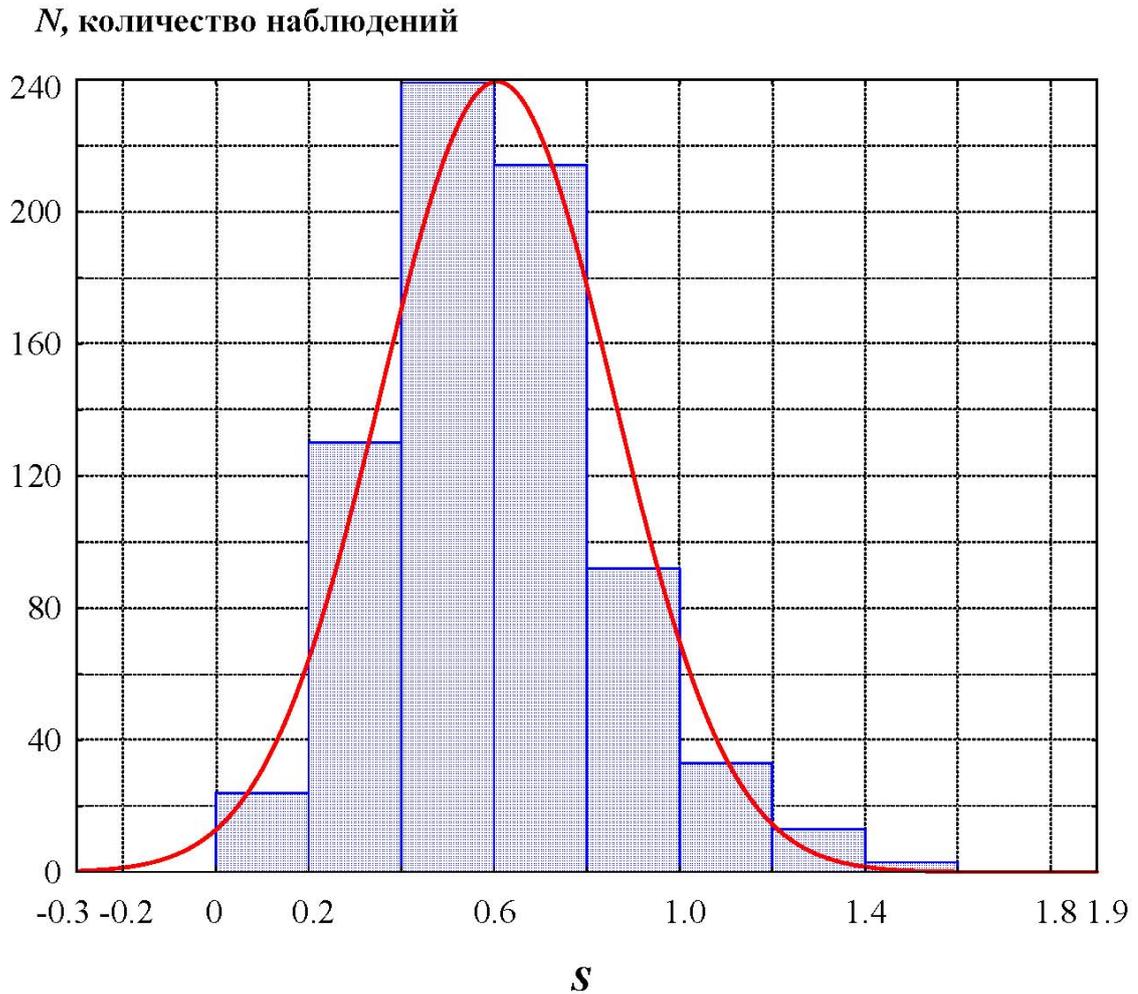


Рисунок 2.3 - Распределение логарифмической ширины спектра  $S$  для всех данных (без учета магнитуды землетрясения, механизма очага, расстояния и грунтовых условий)

Логарифмическая ширина спектра является стабильной величиной и составляет

$$S = 0.60 \pm 0.24. \quad (2.7)$$

Коэффициент корреляции с магнитудой - около 0.13. Коэффициент корреляции с логарифмом кратчайшего расстояния к поверхности разрыва тот же

самый. 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.

Если учесть тип подвижки в очаге и тип грунта в точке наблюдения, см., например, [Аптикаев, Эртелева, 2001; Аптикаев, 2012; Эртелева и др., 2011], то величина стандартного отклонения составит 0.20 ед. десятичного логарифма.

Формула (2.7) тогда принимает вид

$$S = 0.60 + C_1 + C_2 \pm 0.20, \quad (2.8)$$

где  $C_1$  - поправка за механизм очага:  $C_1 = -0.05$  для взбросов и поддвигов,  $C_1 = 0.0$  для сдвигов и  $C_1 = 0.05$  для сбросов;

$C_2$  - поправка за грунтовые условия:  $C_2 = -0.1$  для грунтов I категории,  $C_2 = 0.0$  для грунтов II категории и  $C_2 = 0.1$  для грунтов III и IV категорий.

Отметим особо, что при этом уровень спектра и преобладающий период должны быть исследованы отдельно.

### 2.3 Использованные данные и методика их обработки

Как было указано в разделе 2.1, чисто эмпирический метод прогноза количественных характеристик сейсмического движения грунта требует для своей реализации обширную базу данных сильных движений: чем разнообразнее имеющиеся данные, тем более корректные и универсальные результаты будут получены.

Эмпирическая база данных параметров сильных движений грунта, явившаяся основой предлагаемой работы, содержит сведения о сейсмических событиях с различными механизмами очага, магнитудами, расстояниями, с различными грунтовыми условиями в пунктах регистрации из различных регионов мира (рисунок 2.4). Диапазон использованных магнитуд составляет  $2 \leq M_S \leq 8$ , кратчайшее расстояние до плоскости разрыва  $R_{кр}$  находится в

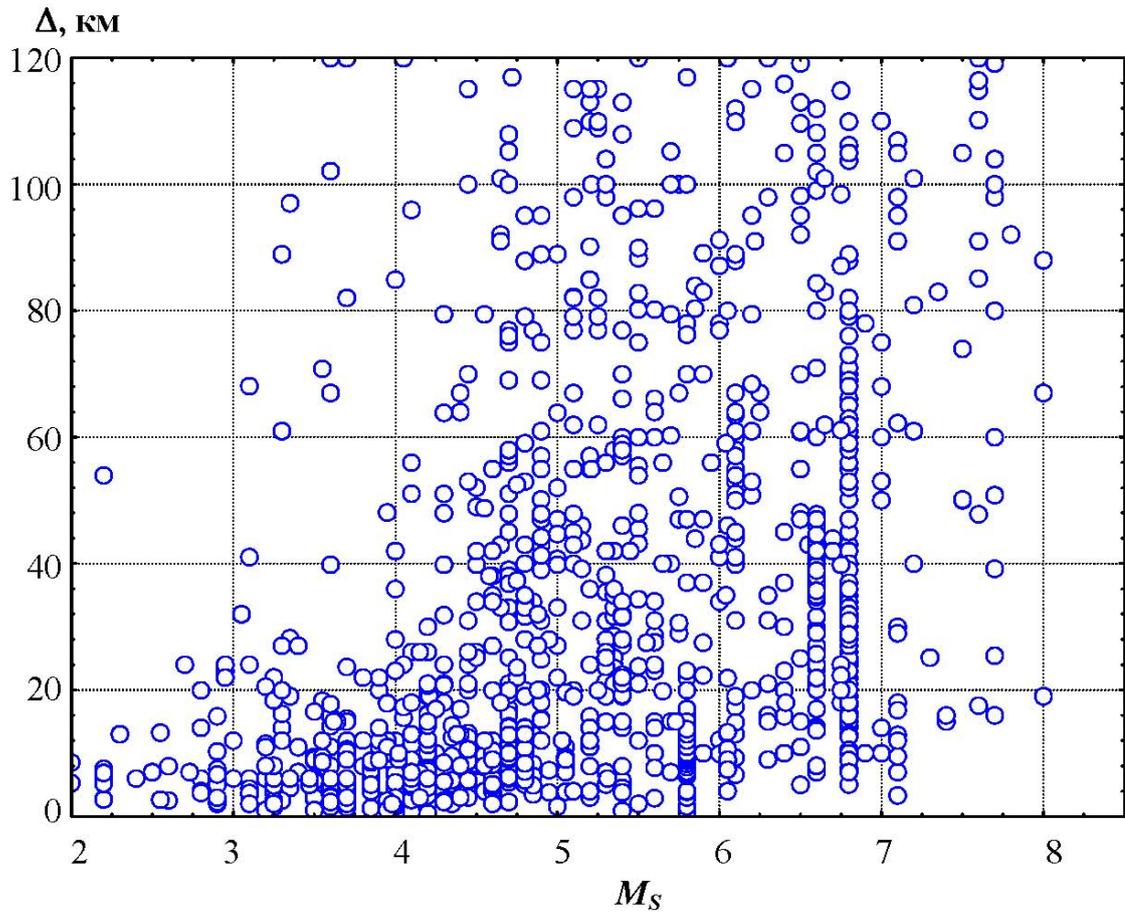


Рисунок 2.4 - Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта (2541 событие)

диапазоне  $0.01 \leq R_{кр}, \text{ км} \leq 100$ , диапазон эпицентральных расстояний - до 175 км.

Рисунки 2.5 и 2.6 представляют распределения использованных данных по магнитуде и расстоянию соответственно.

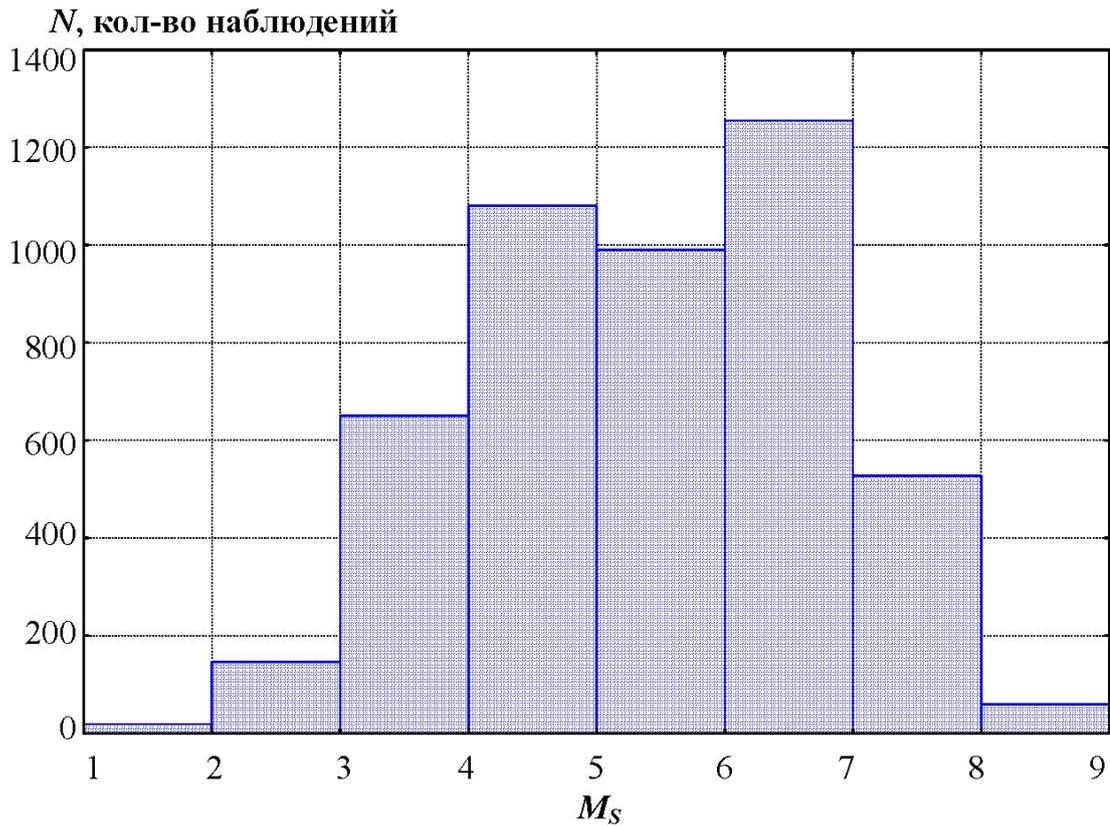


Рисунок 2.5 - Распределение использованных данных по магнитуде  $M_S$

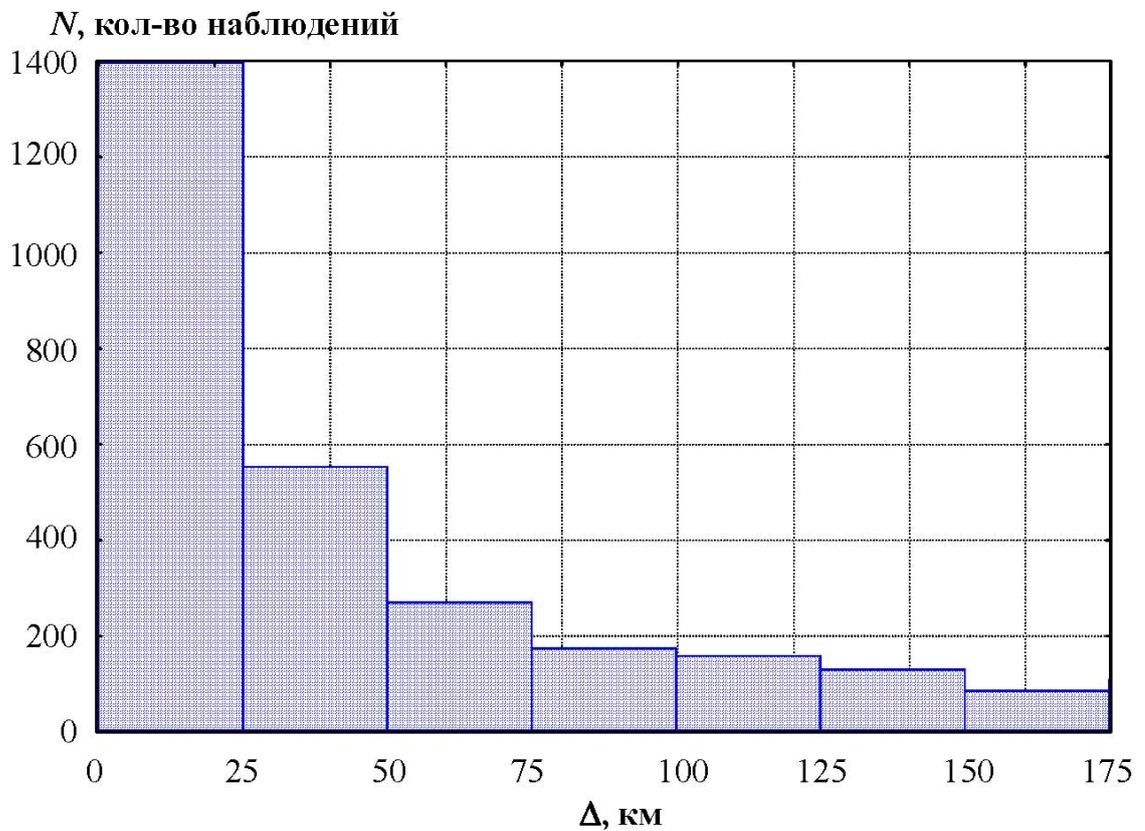


Рисунок 2.6 - Распределение использованных данных в зависимости от эпицентрального расстояния

При составлении базы данных использовались данные из систематических каталогов, таких как [Бюллетени..., 1961 – 1996; Землетрясения..., 1964 – 1993, Землетрясения..., 2000 - 2015; Землетрясения России..., 2016 – 2018; Новый..., 1977; Кудрявцева, Роман, Шебалин, 1973; Рустанович, 1974; Digitized..., 1972; Seismic..., 1974 – 1983; Strong..., 1971 - 1975; Accelerograms..., 1976; 1977a; 1977b; Strong-motion..., 1980; Strong-Motion..., 1981; Berardi et al., 1981; Geotechnical..., 1973; Study..., 1971; Switzer et al., 1981; Strong-motion..., 1976 - 1977; Strong-motion..., 1983 – 1989; Catalogue..., 1989 – 1997; Bulletin..., 1984; Strong..., 1960 – 1993; Etheredge et al., 1987; Porcella et al., 1987; Strong..., 1976; Brady, Perez, 1977; 1978; 1979; Ambraseys, Bommer, 1991 и др.]. Кроме того, использовались как данные из монографий и сборников, посвященных отдельным землетрясениям [например, Газлийские ..., 1982, 1986; Дагестанское..., 1981], так и наборы записей отдельных землетрясений на CD дисках или выложенные в сети Internet [например, Lee W. H. K. et al., 1999.; Seekins L.C. et al., 1992; Kyoshin Net CD-ROM, 1996 - 2002; Ambraseys et al., 2000; 2004 и т.д.]. В распоряжении диссертанта имеются записи, полученные Эпицентральной сейсмологической экспедицией ИФЗ РАН при полевых работах в различных районах России и за рубежом, а также 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 двух сетей станций сильных движений, функционирующих на территории Северо-Восточной Индии, - сети Индийского технологического института, Гуахати (ИТ, Guwahati), работающей с 2005 г., и сети, обслуживаемой департаментом сильных землетрясений Индийского технологического института Рурки (DEQ, ИТ – Roorkee), установленной в 1985 – 1986 гг. в штатах Ассам и Мегхалая. При выполнении Румынско-Российско-Молдавского проекта были получены 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 данных присутствуют сведения о 213 землетрясениях Камчатки и Курильских островов, 55 землетрясениях Сахалина, 147 землетрясениях района Байкала, 342 землетрясениях Кавказа, 270 землетрясениях Средней Азии и Казахстана, 27 землетрясениях Гиндукуша, 5 землетрясениях Афганистана, 60 землетрясениях Пакистана, 6 землетрясениях Памира, 6 землетрясениях Тянь-Шаня, 720 землетрясениях Ирана, 307 землетрясениях Индии, 637 землетрясениях Японии, 9 землетрясениях Китая и Тайваня, 27 землетрясениях Балкан, 76 землетрясениях Европы, 507 землетрясениях Калифорнии, 25 землетрясениях Мексики, 9 землетрясениях Чили, 30 землетрясениях Перу, 38 землетрясениях Новой Зеландии, 26 землетрясениях Аляски и Канады. Количество данных по разным землетрясениям различно. Например, использованы записи 9 станций землетрясения Эль-Сентро (Северная Америка, 15.10.1979), 25 станций землетрясения Чамоли (Индия, 28.03.1999 г.).

Определения глубины имеются для 4371 записи. События, вошедшие в базу данных, в основном, коровые (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Распределение использованных данных по глубинам очагов  
(всего 4371 определение)

№	Глубина очага, км	Количество данных
1	0 – 30	3386
2	31 – 50	337
3	51 – 100	496
4	101 – 200	82
5	200 – 300	58
6	301 – 400	12

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. Среди них есть как взбросы, сдвиги, сбросы, так и события с промежуточным типом механизма (взбросо-сдвиги, сбросо-сдвиги) (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Распределение использованных данных по механизмам очагов  
(всего 2312 определений)

№	Механизм очага	Количество данных
1	Взброс	667
2	Взбрососдвиг	398
3	Сдвиг	965
4	Сбрососдвиг	81
5	Сброс	204

Разнообразны данные и по грунтовым условиям в точке регистрации (таблица 2.3), хотя не все записи имеют такую характеристику.

Таблица 2.3 – Распределение использованных данных по категориям грунтов  
в пунктах регистрации (всего 2880 определений)

№	Категория грунтов по сейсмическим свойствам	Количество данных
1	I	596
2	II	601
3	III	1633
4	IV	50

К тому же, приводимая в описаниях характеристика грунтов зачастую очень нечетка. 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 следующие сведения о землетрясении: дата, время в очаге; район, где произошло сейсмическое событие; глубина очага; набор магнитуд по различным типам волн: магнитуда по объемным волнам  $m_b$ , магнитуда локальная  $M_L$ , моментная магнитуда  $M_W$ , магнитуда по поверхностным волнам  $M_S$ ; глубина очага, механизм очага; название зарегистрировавшей сейсмической станции; категория грунта по сейсмическим свойствам; величина заглубления прибора в месте установки; сейсмическая интенсивность на станции (по какой-либо шкале семейства типа Меркалли); эпицентральное расстояние, гипоцентральное расстояние, кратчайшее расстояние до плоскости разрыва, нормированное расстояние; характеристики ускорения для трех компонент - максимальной горизонтальной компоненты: преобладающий период спектра реакции, низко- и высокочастотная логарифмические полуширины спектра реакции, логарифмическая ширина спектра реакции, коэффициент динамического усиления, продолжительность колебаний, пиковое ускорение грунта; для второй горизонтальной компоненты – пиковое ускорение грунта, преобладающий период спектра реакции, коэффициент динамического усиления, продолжительность колебаний; среднее геометрическое значение пикового ускорения по двум горизонтальным ускорениям; для вертикальной компоненты – пиковое ускорение, преобладающий период спектра реакции, продолжительность колебаний; характеристики 3 компонент скорости колебаний – максимальное значение амплитуды, преобладающий период, продолжительность колебаний; характеристики 3 компонент смещения колебаний

– максимальное значение амплитуды, преобладающий период, продолжительность колебаний. 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 с различными очаговыми параметрами и различными грунтовыми условиями в пункте регистрации. Кроме того, количество событий при корреляции различных величин также не оставалось постоянным вследствие неполноты исходных данных (например, отсутствовала запись какой-либо компоненты, или определение механизма очага, или значение расстояния и т.п.).

В работе рассматривалось влияние на параметры сейсмических колебаний следующих характеристик среды и очагов землетрясений: магнитуды, расстояния, типа подвижки в очаге, грунтовых условий.

В связи с тем, что в разных публикациях и материалах содержатся данные в различных единицах измерения, для приведения к единообразию использованных данных применялись следующие процедуры.

Все расстояния приведены в километрах. 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 различны. Поскольку такое преобразование данных позволяет исключить влияние магнитуды, то данные всех магнитуд обрабатываются совместно.

Амплитуды ускорений приводятся в  $\text{см}/\text{с}^2$ , скоростей в  $\text{см}/\text{с}$  и т.д. 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. Указанная погрешность возрастает с приближением к эпицентру землетрясения.

Частотный состав характеризуется преобладающим периодом и логарифмической шириной спектра реакции.

Все энергетические оценки были приведены к магнитуде по поверхностным волнам  $M_S$ . В качестве оценки  $M_S$  принималось среднее значение из  $M_S$  и  $M_{LH}$  с округлением с точностью до 0.1 в сторону оценки  $M_{LH}$  [Аптикаев, 2012]. В случае отсутствия оценок магнитуд по поверхностным волнам, в качестве  $M_S$  принималось среднее из пересчитанных оценок по другим шкалам. Использовались следующие соотношения из работы [Аптикаев, 2012], где была проведена корреляция различных магнитудных шкал с использованием метода медиан (при этом максимальная погрешность корреляции магнитуд не превышает 0.05 магнитудной единицы):

$$M_S = 1.275 M_L - 1.55 \quad (2.9)$$

$$M_S = 1.22 M_{JMA} - 1.40 \quad (2.10)$$

$$M_S = 1.454 m_b - 2.555 \quad (2.11)$$

$$M_S = 0.705 K - 4.16 \quad (2.12)$$

$$M_S = 2.114 M_D - 4.528 \quad \text{для } M_D < 3.25 \quad (2.13)$$

$$M_S = 4.333 M_D - 7.766 \quad \text{для } M_D \geq 3.25, \quad (2.14)$$

где  $M_{JMA}$  – магнитуда шкалы локальных магнитуд Японии,

$M_D$  – магнитуда, определяемая по длительности колебаний (для станций Италии),

$M_L$  – локальная магнитуда по Рихтеру,

$m_b$  – магнитуда по объемным волнам,

$K$  – энергетический класс.

Метод медиан проще метода наименьших квадратов особенно для нелинейных зависимостей, и обладает более высокой точностью. При потере представительности данных по одной или обоим переменным по каким-либо причинам график медиан начинает отклоняться в направлении перпендикулярном соответствующей оси координат [Артикаев, Михайлова, 1985; Mikhailova, Artikaev, 1996]. В результате не допускаются ошибки, связанные с непредставительностью, а при наличии оценок, обладающих большими отклонениями от среднего, их влияние минимизируется.

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

Глубина очага выбиралась из бюллетеня Международного сейсмологического центра, Беркли, Великобритания (ISC, International Seismological Center, Berkshire, UK), если оценка отсутствовала, то оценки, полученные другими службами, осреднялись.

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

В ходе исследований применялось понятие подобия из теории подобия и размерностей [см., например, Седов, 1987]. Простейшее понятие подобия относится к геометрическим фигурам: две фигуры подобны, если отношения всех соответствующих длин одинаковы. Численная величина отношения называется коэффициентом подобия. При изучении физических явлений два явления считаются подобными, если по известным параметрам одного из них можно получить соответствующие параметры второго путем пересчета. Иными словами, такой пересчет соответствует переходу от одной системы измерений к другой (аналог преобразования координат). Очевидно, чтобы осуществить такой переход,

необходимо использовать соответствующий числовой коэффициент, называемый масштабирующим множителем. Фактически масштабирующий множитель показывает во сколько раз размер одного явления больше (или меньше) размера другого. При этом согласно теории подобия и размерностей все безразмерные параметры имеют одинаковое численное значение для рассматриваемой совокупности подобных явлений, т.е. безразмерные величины не зависят от масштабов явления.

## 2.4 Выводы

1. Приведена классификация существующих методов прогноза параметров сейсмических колебаний.

2. Показано, что 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), и логарифмическая ширина спектра реакции. 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.

### Глава 3 ПИКОВЫЕ УСКОРЕНИЯ ГРУНТА

Ускорение традиционно является наиболее употребляемой характеристикой сейсмического движения грунта. Следуя методике, изложенной в главе 2, изучение сейсмических колебаний в ускорениях проведем в двух направлениях: во временной области и спектральной. Во временной, прежде всего, необходимо изучить закон затухания пиковых амплитуд ускорений, и зависимость продолжительности колебаний от различных факторов.

В спектральной области рассмотрим зависимость преобладающего периода и коэффициента динамического усиления от различных факторов, определяемых очагом и средой, а также внутренние взаимосвязи коэффициента динамического усиления с отдельными параметрами спектра реакции в ускорениях.

#### 3.1 Затухание пиковых амплитуд ускорений грунта

Проанализируем распределение пиковых амплитуд ускорений грунта ( $PGA$ ) на кратчайших расстояниях до разлома ( $R_{кр}$ ) (рисунок 3.1), используя описанную в главе 2 базу данных сильных движений.

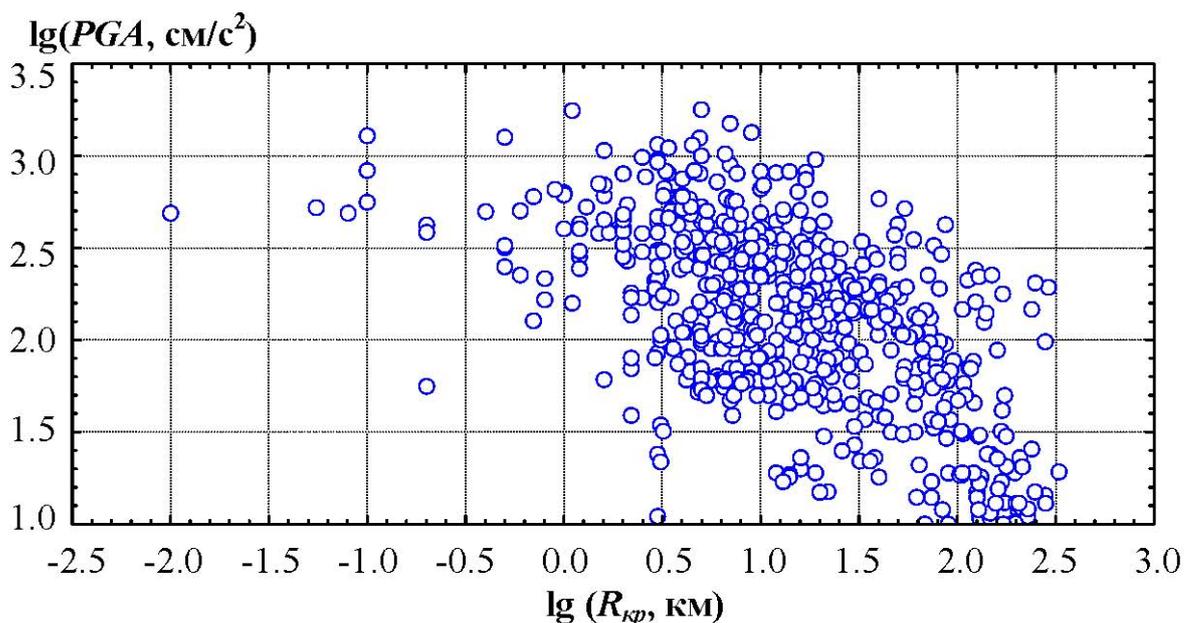


Рисунок 3.1 - Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта (838 событий)

Ранее установлено [Составление..., 1996], что  $\lg PGA$  для землетрясений с различными магнитудами ( $M$ ) хорошо масштабируется сдвигом кривой затухания вдоль оси расстояний ( $R$ ), а не вдоль оси амплитуд, при этом  $PGA$  на поверхности разрыва не зависит от магнитуды, см. главу 1. Кроме того, согласно [Аптикаев, Эртелева, 2002], для каждой магнитуды выделяются три зоны с различным затуханием, в которых закон нормирования выглядит следующим образом:

$$\lg R^* = \lg R_{кр} - 0.33 M_S, \quad (3.1)$$

где  $R_{кр}$  – кратчайшее расстояние до поверхности разлома,

$R^*$  – нормированное расстояние.

Если использовать равенство (3.1), можно получить соотношения затухания  $PGA$  с использованием землетрясений разных магнитуд (рисунок 3.2).

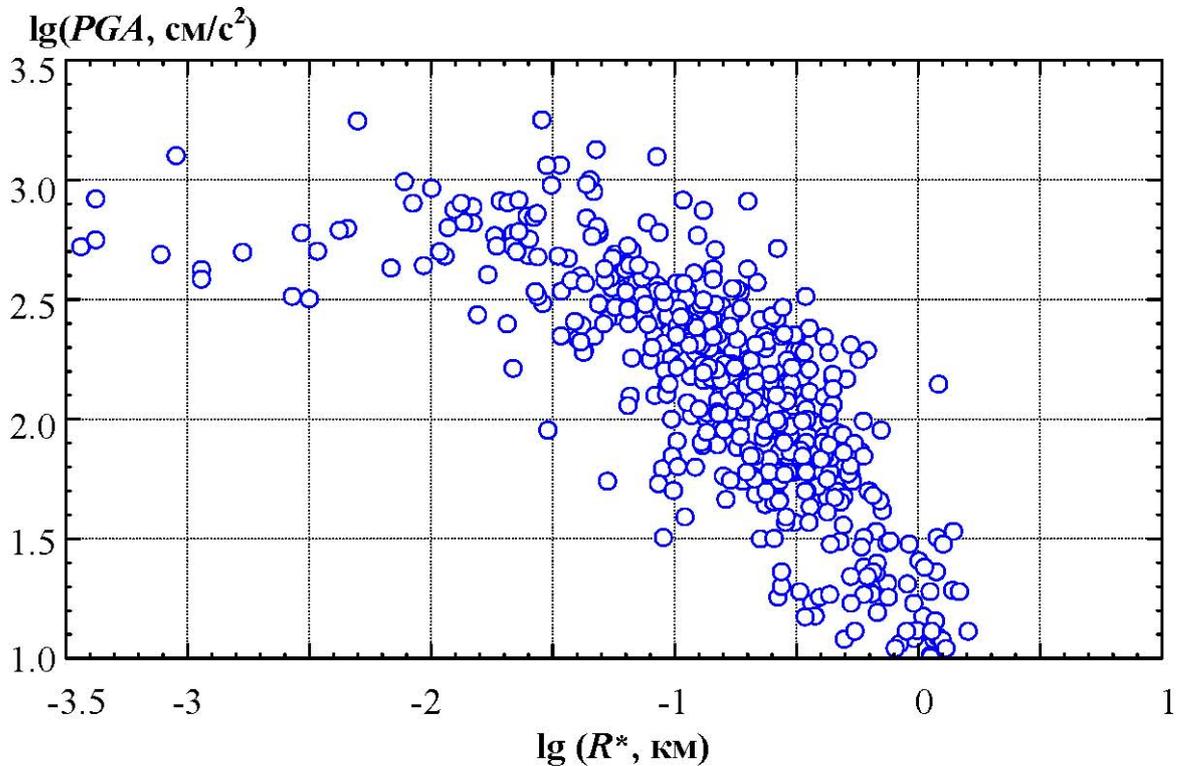


Рисунок 3.2 - Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта на нормированных расстояниях (838 событий)

В имеющейся базе данных наименьшее нормированное расстояние в данном случае принимается  $R_0^* = 0.0004$  км (что для землетрясения магнитуды  $M = 6$  соответствует примерно 40 метрам). Конечно, сейсмические записи могут быть получены и гораздо ближе к разлому, но аппроксимировать результаты к нулю при использовании логарифмической шкалы невозможно.

В качестве первого шага этой процедуры были выбраны только данные, полученные от землетрясений со сдвиговым механизмом (рисунок 3.3).

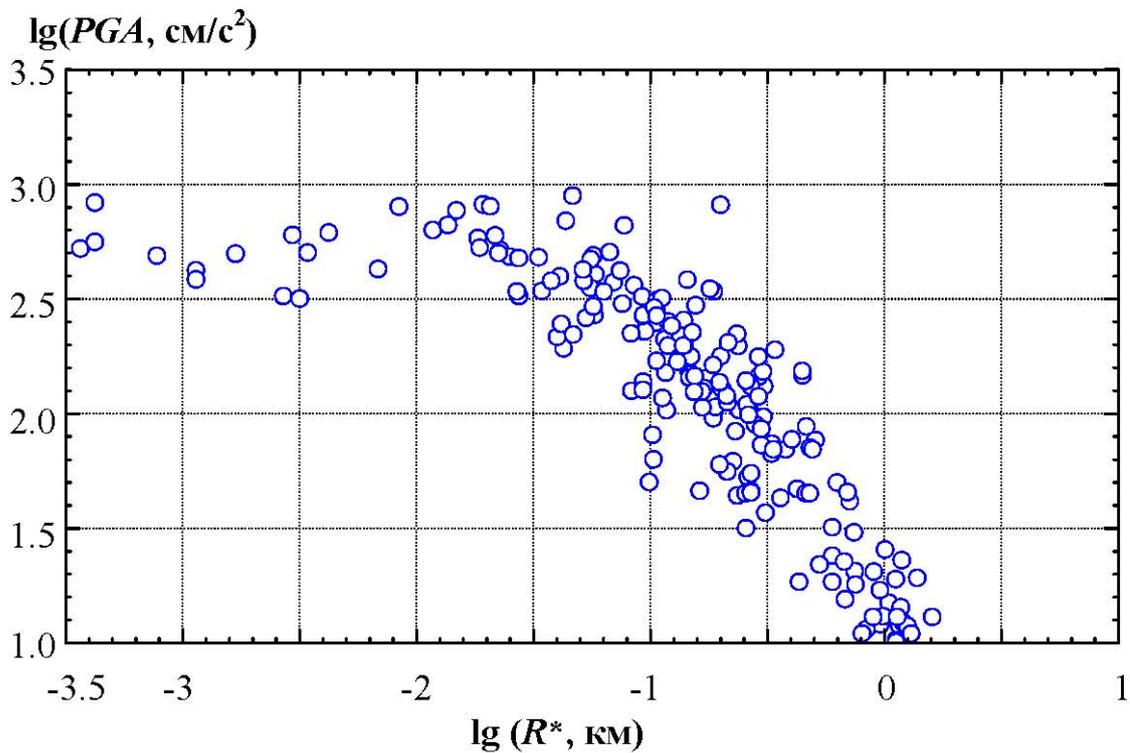


Рисунок 3.3 - Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта сдвиговых землетрясений на нормированных расстояниях (фрагмент, 143 события)

Затем из этой группы выбирались данные, зарегистрированные на грунтах III и IV категорий по сейсмическим свойствам (чтобы исключить влияние на результаты таких факторов как механизм очага и тип грунта) (рисунок 3.4), и, наконец, рассматривалось полученное распределение пиковых ускорений грунта от расстояния (рисунок 3.5).

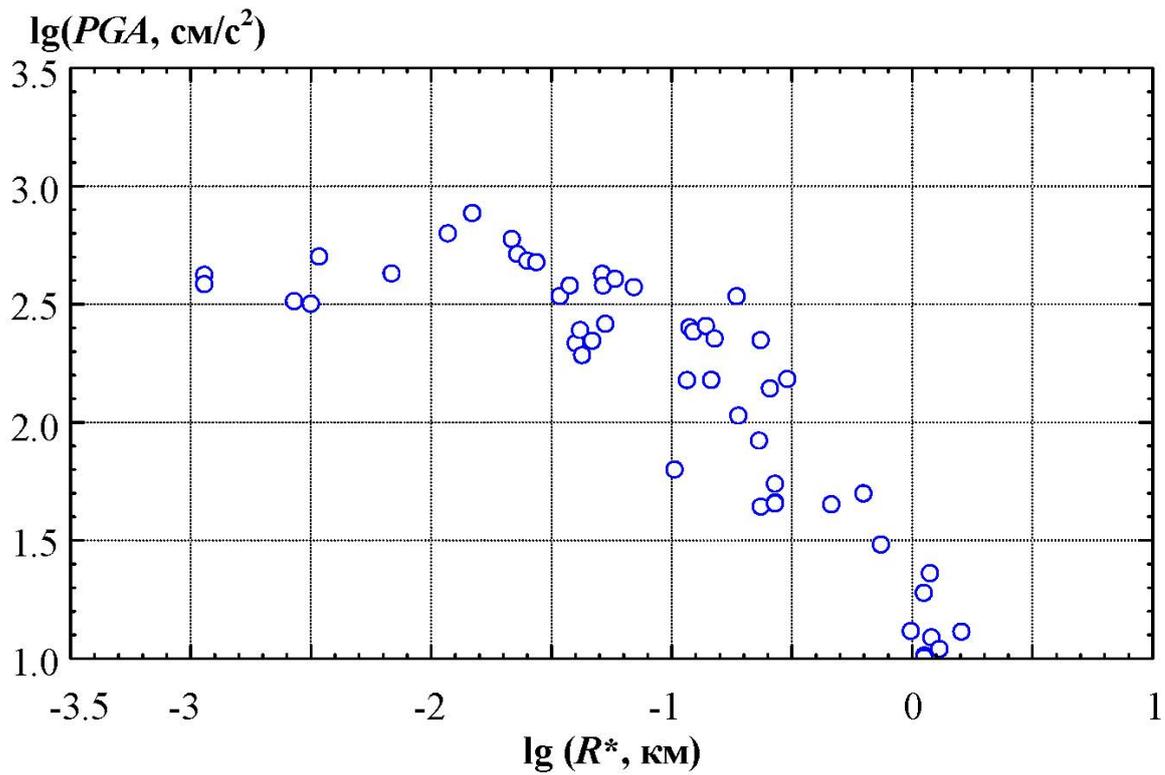
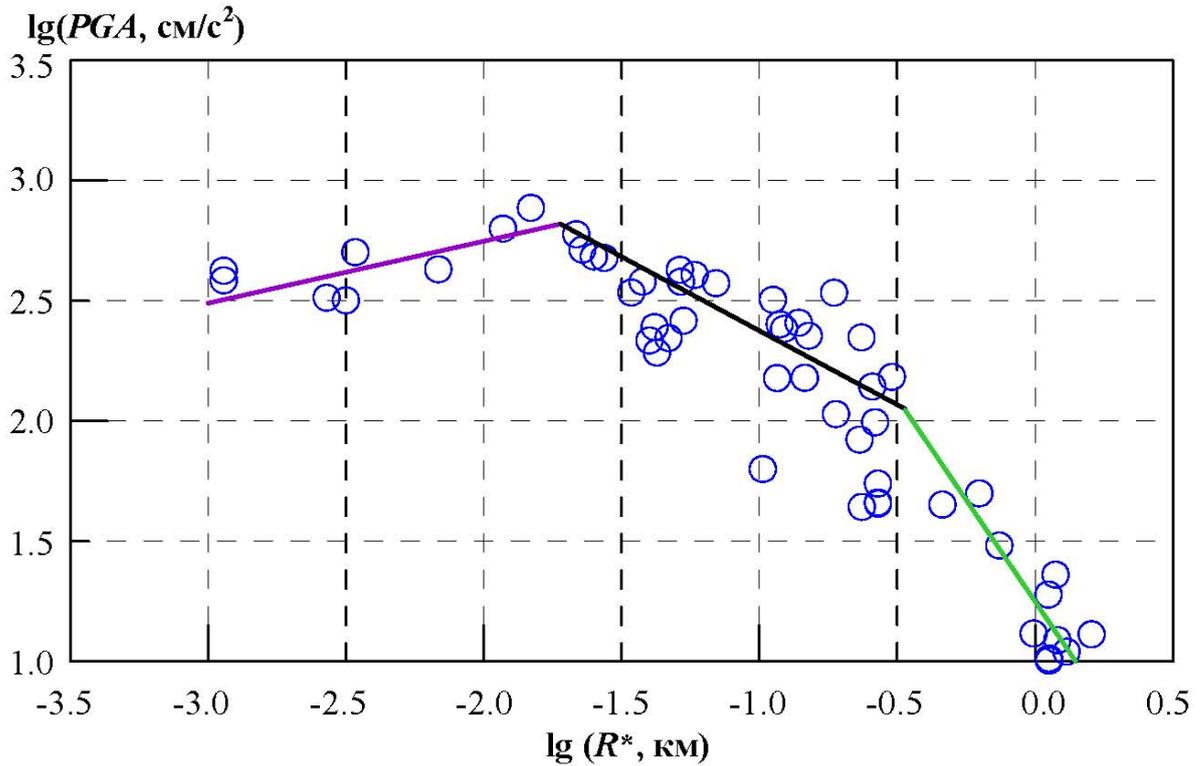


Рисунок 3.4 – Диаграмма разброса пиковых ускорений грунта землетрясений сдвигового типа, грунты III и IV категорий, на нормированных расстояниях  $R^*$  (фрагмент, 85 событий)



Аппроксимирующие прямые: фиолетовая линия - для разломной зоны,  
 черная линия – для ближней зоны, зеленая линия – для дальней зоны;  
 кружки – эмпирические данные

Рисунок 3.5 – Затухание пиковых ускорений грунта землетрясений сдвигового типа на грунтах III и IV категорий

Как видно из рисунка 3.5, четко выделяются три зоны, в каждой из которых можно построить свою аппроксимирующую прямую. Соотношение для первой зоны, непосредственно примыкающей к разлому, имеет вид:

$$\lg(PGA, \text{см/с}^2) = 3.30 + 0.27 \lg R^*. \quad (3.2)$$

Назовем эту часть ближней зоны разломной. Стандартное отклонение вследствие малочисленности данных для аппроксимирующей прямой разломной зоны не вычислялось.

Соотношение затухания для второй (ближней) зоны имеет вид:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 1.75 - 0.63 \lg R^* \pm 0.15. \quad (3.3)$$

В общем случае разброс оценок вблизи границы между второй и третьей зоной связан с вариациями амплитуд во второй зоне, с погрешностями в определении расстояний в третьей зоне и ошибками в определении категории грунта.

Уравнение аппроксимирующей прямой для третьей (дальней) зоны имеет вид:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 1.25 - 1.69 \lg R^* \pm 0.08. \quad (3.4)$$

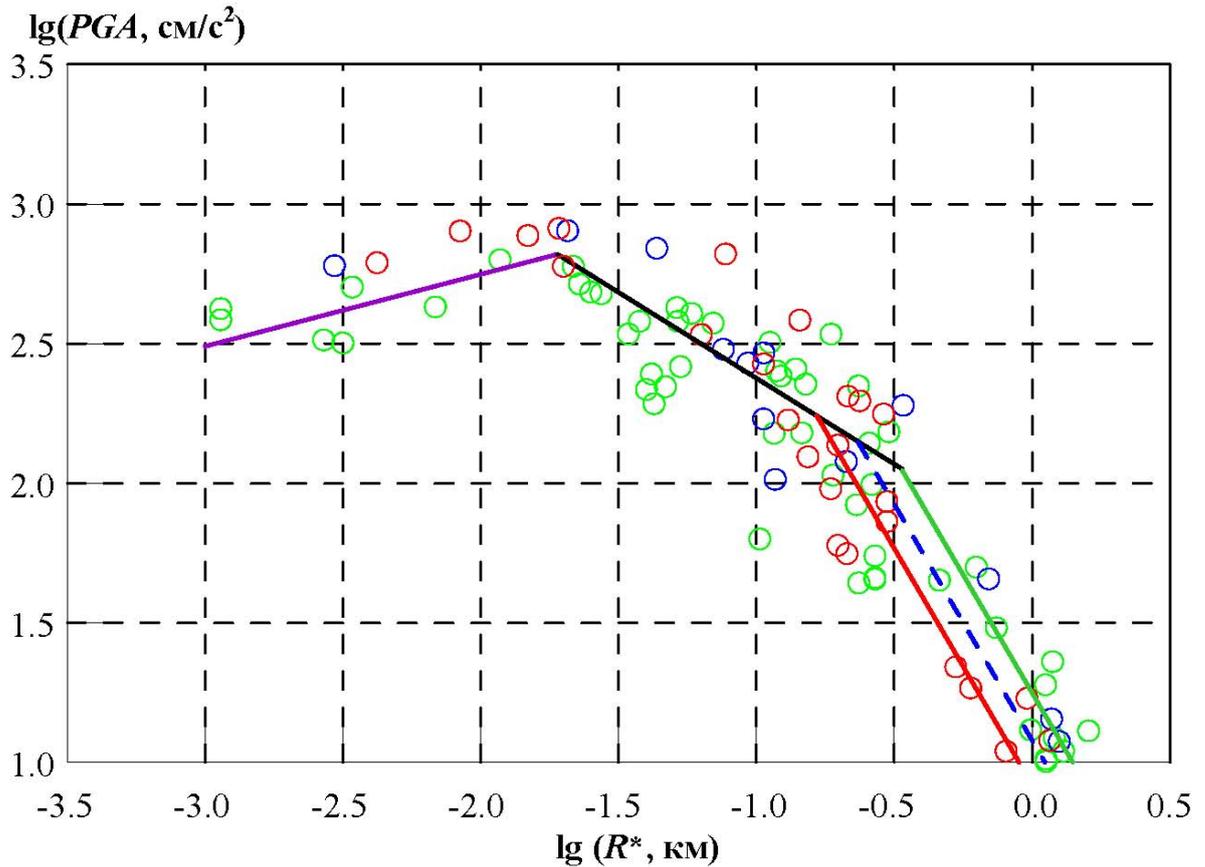
Малая величина стандартного отклонения, возможно, связана с недостаточным количеством данных.

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 (рисунок 3.6).

В результате было установлено, что затухание в первых двух зонах, составляющих очаговую, не зависит от типа грунта (уравнения (3.2) и (3.3) остаются неизменными). Влияние же грунтовых условий на уровень  $PGA$  существенно в дальней зоне. Уравнение (3.4) тогда можно записать в общем виде:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_2 - 1.69 \lg R^* \pm 0.20, \quad (3.5)$$

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



Красная линия – аппроксимирующая линия затухания на грунтах I категории, голубая - на грунтах II категории, зеленым - на грунтах III и IV категории

Рисунок 3.6 – Закон затухания пиковых ускорений грунта для сдвиговых землетрясений

Как указывалось в главе 2, в литературных источниках грунты часто подразделяются только на две категории “скальные” и “рыхлые”. Поэтому в использованной выборке данных по грунтам второй категории недостаточно, и участок кривой затухания в дальней зоне, соответствующий грунтам второй категории, построен между линиями для грунтов первой и третьей категорий.

На третьем этапе исследовалась зависимость затухания пиковых ускорений от типа механизма очага: процедуры, описанные выше, были проведены для выборок данных с механизмами других типов.

В результате автором было установлено, что влияние типа механизма очага важно только в первой, разломной зоне. В этой зоне  $PGA$  возрастает с

расстоянием от некоего минимального значения до максимального значения на границе с частью ближней зоны, где амплитуды начинают убывать ( $R_1^*$ ). Уравнение затухания в общем случае для разломной зоны может быть записано в виде:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_o + 0.27 \lg R^* \pm 0.18, \quad (3.6)$$

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

Далее в ближней зоне вплоть до границы с дальней зоной начинается процесс затухания, но закон затухания  $PGA$  не зависит от типа грунта и механизма очага. Этот участок описывается уравнением (3.3). В то же время положение границы  $R_1^*$  разломной зоны определяется именно типом механизма очага. Положение это можно определить, используя уравнения (3.2) и (3.3):

$$\lg R_1^* = (1.75 - C_o) / 0.90. \quad (3.7)$$

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

Значения постоянной  $C_o$  в выражениях (3.6) и (3.7), минимальные и максимальные значения  $PGA$  в разломной зоне приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Закон затухания  $PGA$  в разломной зоне

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

В дальней зоне затухание резко усиливается. Влияние типа вспарывания на уровень  $PGA$  не наблюдается. Значение  $PGA$  определяется грунтовыми

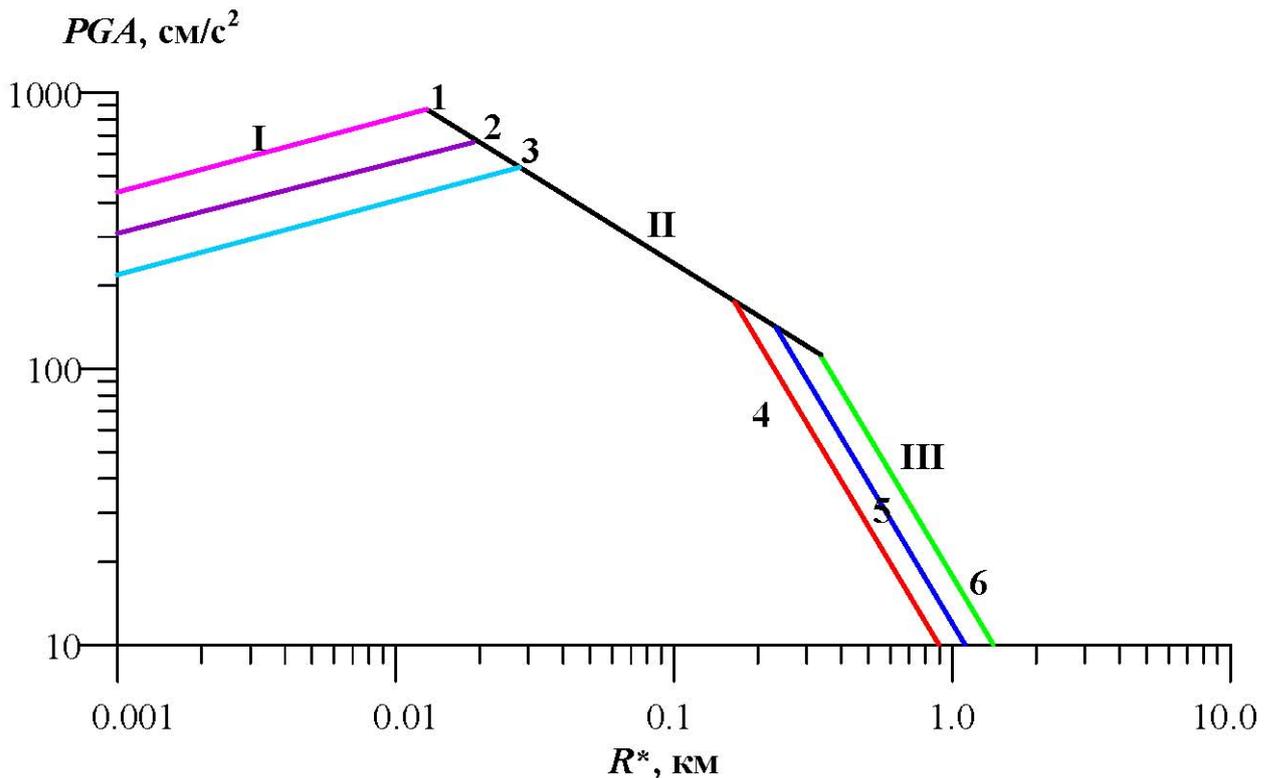
условиями. Рассматриваемый участок кривой затухания представляется, как и выше, уравнением (3.5).

Тип грунта определяет и положение границы между ближней и дальней зонами ( $R_2^*$ ). Используя выражения (3.3) и (3.5), имеем:

$$\lg R_2^* = (C_2 - 1.75) / 1.03, \quad (3.8)$$

где  $C_2$  - как и выше, постоянная, зависящая от типа грунта (см. формулу (3.5)).

В графическом виде полученный эмпирический закон затухания для  $PGA$  показан на рисунке 3.7.



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

Рисунок 3.7 - Закон затухания пиковых амплитуд ускорений грунта  $PGA$

Как видим, в разломной зоне явно наблюдается увеличение амплитуд с расстоянием, что отмечалось и в других работах [Artikaev, Erteleva, 2007; Graizer, Kalkan, 2007, 2011]. Уровень ускорений зависит от типа подвижка в очаге. В этой зоне каждый элемент среды излучает энергии больше, чем поглощает. Поэтому распространяющийся волновой фронт постоянно имеет энергетическую подпитку, которая и выражается в увеличении  $PGA$ .

Далее 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 пиковое ускорение равно  $175 \text{ см/с}^2$ , 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.

На расстояниях, значительно превышающих размеры очага, 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.

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 подобие расстояний определяется по другому закону масштабирования, а именно: в этом случае подобные расстояния должны измеряться в длинах волн. Иными словами, 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:

$$k = k_1 + k_2 / \lg \lambda, \quad (3.9)$$

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

Однако, как будет показано ниже (см. раздел 3.4.1), в дальней зоне  $\lg T_0 \sim 0.17 M_S$ . Тогда

$$k = c - 0.17 M_S, \quad (3.10)$$

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

Как видно из последнего, в дальней зоне с ростом магнитуды уменьшается коэффициент затухания.

Поскольку ранее [Аптикаев, Эртелева, 2002] было получено для  $M_S \approx 5$  значение  $k = 1.92$ , то имеем  $c = 2.77$ . Проверим справедливость определения на примере более сильного (магнитуда  $M_S = 8.0$ ) Веньчуанского землетрясения 12.05.2008 г. Затухание амплитуд в дальней зоне для этого землетрясения можно аппроксимировать значением  $k = 1.4$  по эмпирическим данным, приведенным в работе [Lu et al., 2010]. По найденной формуле (3.10) получаем  $k = 1.41$ .

Для выборки данных, использованной в данной работе, при построении формулы (3.5) получено значение  $k = 1.69$ . При использовании коэффициента  $c = 2.77$  для средней в выборке магнитуды  $M_S = 6.3$  имеем  $k = 1.70$ .

Теперь проверим найденное выражение для малых магнитуд. В работе [Гарагозов, 1999] получено уравнение затухания с коэффициентом  $k = 2.2$ . В использованном автором этой работы наборе данных большинство землетрясений имело магнитуду не выше  $M_S = 4$  (точных данных о распределении магнитуд не

приводится). Подставляя  $M_S = 4$  в формулу (3.10), получаем  $k = 2.1$ , что соответствует оценке, приведенной выше.

В среднем для  $c$  получаем значение 2.76. Итак, для дальнейшей зоны затухание  $PGA$  может быть описано эмпирической формулой:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = C_2 - (2.76 - 0.17 M_S) \lg R^* \pm 0.20, \quad (3.11)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта в точке наблюдения и описанная в формуле (3.5).

Установленные закономерности затухания и соответствующие им корреляционные уравнения получены по совокупности данных из разных регионов мира и, следовательно, носят обобщенный характер. Назовем их среднемировыми. Но возникает вопрос, как проявляются в этих процессах региональные особенности затухания. Для ответа на этот вопрос выберем данные отдельных районов, не использовавшиеся при построении среднемировой кривой затухания, и, проведя процедуры, аналогичные описанным выше, построим соответствующие кривые затухания, а затем сравним региональные законы затухания со среднемировыми.

Для примера рассмотрим данные по землетрясениям северо-запада Индии – одного из самых сейсмически активных районов мира. Используем данные по трем сильным землетрясениям этого района, полученные при работе в рамках совместного российско-индийского проекта по оценке сейсмической опасности ряда городов в северо-западных Гималаях Индии. Это – землетрясение Дхарамсала (Dharamsala), 26.04.1986 ( $M_S = 5.4$ ,  $h = 5$  км), Уттаркаши (Uttarkashi), 20.10.1991 ( $M_S = 6.8$ ,  $h = 14$  км) и Чамоли (Chamoli), 28.03.1999 ( $M_S = 6.7$ ,  $h = 8$  км). События были записаны местной сетью станций сильных движений. Механизм землетрясений – взброс, станции располагались на скальных грунтах [Kumar et al., 1997; Kumar et al., 1999].

При построении кривой затухания магнитуда землетрясения Уттаркаши,  $M_S = 6.8$ , была выбрана в качестве расчетной, поскольку большинство данных относится к этому землетрясению. Оценки расстояний взяты из работы [Эртелева и др., 2019]. Для каждой станции с использованием формулы (3.1) были определены нормированные расстояния  $R^*$ . При этом, учитывая зависимость затухания в дальней зоне от длины волны ( $a$ , следовательно, и от магнитуды), для пунктов регистрации землетрясения Дхарамсала по формуле (3.11) введена поправка за счет разницы расчетной магнитуды (6.8) и магнитуды этого землетрясения (5.4): при  $M_S = 6.8$  затухание происходит по степени минус 1.6, а для магнитуды  $M_S = 5.4$  - по степени минус 1.84. Поскольку величина магнитуды землетрясения Чамоли близка к расчетной, то такие поправки для данных этого землетрясения оказались малы и не вводились.

Данные, использованные при расчете кривой затухания, приведены в таблицах 3.2 – 3.4.

Таблица 3.2 – Параметры записей сильных движений землетрясения Дхарамсала (Dharamsala) 26.04.1986 ( $M_S = 5.4$ ,  $h = 5$  км)

<b>С/станция</b>	<b><math>R</math>, км</b>	<b><math>R^*</math>, км</b>	<b><math>PGA</math>, см/с<sup>2</sup></b>
Baroh	20.6	0.48	59
Dharamsala	6.4	0.10	186
Jawali	29.7	0.65	17
Kangra	11.0	0.19	148
Nagrodabadwan	9.6	0.17	149
Shahpur	11.2	0.19	248
Sihunta	22	0.52	51

Таблица 3.3 – Параметры записей сильных движений землетрясения Уттаркаши (Uttarkashi), 20.10.1991 ( $M_S = 6.8$ ,  $h = 14$  км)

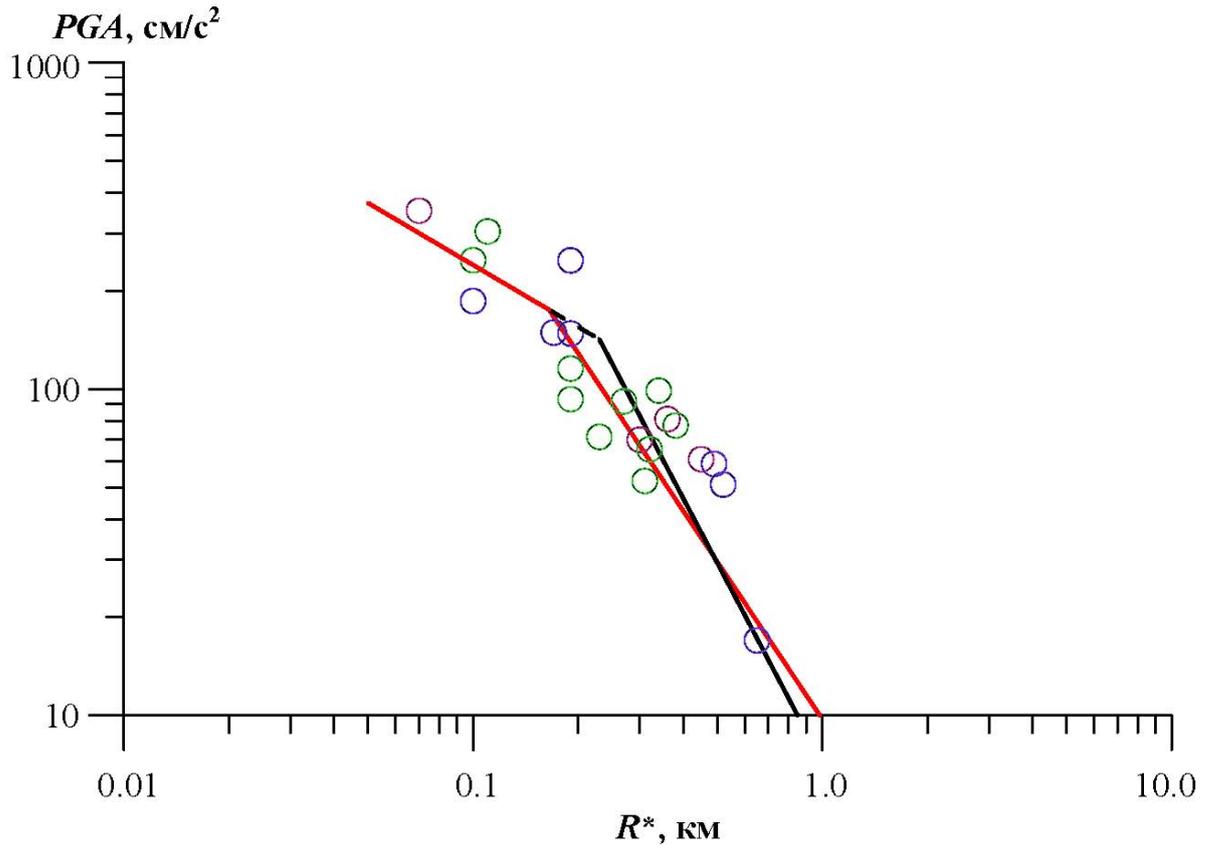
<b>С/станция</b>	<b><math>R</math>, км</b>	<b><math>R^*</math>, км</b>	<b><math>PGA</math>, см/с<sup>2</sup></b>
Barkot	34	0.19	93.2
Bhatwari	18	0.10	248.4
Ghansiali	34	0.19	115.6
Karnprayag	66	0.38	77.4
Gopeshwar	59	0.34	98.9
Purola	48	0.27	91.7
Rudraprayag	55	0.31	52.3
Srinagar	56	0.32	65.4
Tehri	40	0.23	71.4
Uttarkashi	20	0.11	304.0

Таблица 3.4 – Параметры записей сильных движений землетрясения Чамоли (Chamoli), 28.03.1999 ( $M_S = 6.7$ ,  $h = 8$  км)

<b>С/станция</b>	<b><math>R</math>, км</b>	<b><math>R^*</math>, км</b>	<b><math>PGA</math>, см/с<sup>2</sup></b>
Chinyalisaur	85	0.52	51.0
Ghansiali	59	0.36	81.0
Gopeshwar	12	0.07	352.0
Joshimath	48	0.30	70.0
Tehri	73	0.45	61.0

Построенная региональная кривая затухания показана на рисунке 3.8, на котором нанесены и исходные данные.

Как видно, полученная кривая затухания для северо-запада Индии состоит из 2 участков. Уравнение затухания для разломной зоны не получено в связи с отсутствием данных. Имеющиеся эмпирические данные для ближней зоны



Розовые кружки – пиковые ускорения грунта при землетрясении Чамоли, 1999;  
 зеленые кружки – пиковые ускорения при землетрясении Уттаркаши, 1991;  
 фиолетовые кружки - пиковые ускорения при землетрясении Дхарамсала, 1986.  
 Черным цветом показана кривая затухания для дальней зоны по данным местных  
 землетрясений, пунктирная линия – экстраполяция участка ближней зоны;  
 красным – кривая затухания для ближней зоны и дальней зоны на грунтах I  
 категории по формулам (3.3) и (3.11) соответственно

Рисунок 3.8 – Затухание пиковых ускорений грунта  
 землетрясений северо-западных Гималаев (Индия)

малочисленны, поэтому проведение аппроксимирующей прямой с их использованием было бы статистически необоснованным. Как видно из рисунка 3.8 по расположению эмпирических данных, существует точка, после которой наблюдается резкое затухание пиковых амплитуд. Точка излома расположена на расстоянии около  $R^* = 0.2$  км. Как было показано (см., например, рисунок 3.7),

этой точке соответствует положение границы между ближней и дальней зонами. Тогда для построения аппроксимирующей прямой для ближней зоны используем уравнение (3.3). Как можно заключить из рисунка 3.8, согласие этой прямой с эмпирическими данными оказалось вполне удовлетворительным: стандартное отклонение не превышает 0.1 единиц десятичного логарифма.

Корреляционное уравнение для дальней зоны имеет вид:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 1.115 - 1.64 \lg R^* \pm 0.10. \quad (3.12)$$

На рисунке 3.8 также показан участок кривой затухания в дальней зоне на грунтах I категории, построенный по мировым данным:

$$\lg (PGA, \text{см/с}^2) = 0.989 - 1.604 \lg R^* \pm 0.20. \quad (3.13)$$

Как следует из рисунка 3.8, различия в оценках амплитуд по формулам (3.12) и (3.13) незначительны.

Следовательно, кривая затухания для данных из разных регионов мира достаточно хорошо описывает затухание и в этом регионе, а применение региональной кривой, полученной только по местным данным, ведет лишь к уменьшению стандартного отклонения.

Рассмотрим другой регион - Иран. Большинство использованных записей сильных движений получено при землетрясении Бам, 26.12.2003 г. ( $M_s = 6.8$ ,  $M_w = 6.6$ ) [Manafpour, 2005]. Записи из других районов Ирана были предоставлены компанией “Махаб Гходсс” (“Mahab Ghodss Consulting Engineering Company”) в процессе работ по оценке сейсмических воздействий на площадке АЭС “Бушер” (Иран). Все акселерограммы были зарегистрированы сетью станций сильных движений Ирана, которая обслуживалась Центром строительства и инженерных исследований (BHRC).

Механизм землетрясения Бам – сдвиг [Manafpour, 2005; Talebian et al., 2004]. Механизмы очагов других землетрясений – взбросового типа. Оценки

пиковых ускорений грунта этих землетрясений приведены к уровню сдвиговых землетрясений с использованием таблицы 3.1. Грунтовые условия при расчете кривой затухания не учитывались вследствие ненадежности их определения (по иранским данным грунты в местах установки акселерографов классифицированы только по двум группам – твердые и рыхлые; кроме того, часто применяется классификация грунтов по генетическому признаку, например, “аллювий”, который может быть представлен галечником, гравием, песком, суглинком). Магнитудный диапазон использованных записей составляет  $2.5 \leq M_S \leq 7.4$ , диапазон кратчайших до разлома расстояний составляет  $2 < R, \text{ км} < 284$ .

В качестве расчетной была принята магнитуда землетрясения Бам, поскольку большинство записей было получено именно при этом землетрясении. Как и ранее, для каждой станции определялись нормированные расстояния с введением поправок за магнитуду: в ближней зоне - по формуле (3.1), а в дальней зоне - по формуле (3.11). Использованные для расчета кривой затухания данные приведены в таблице 3.5 и на рисунке 3.9.

Уравнение для дальней зоны по местным данным без учета грунтовых условий имеет вид:

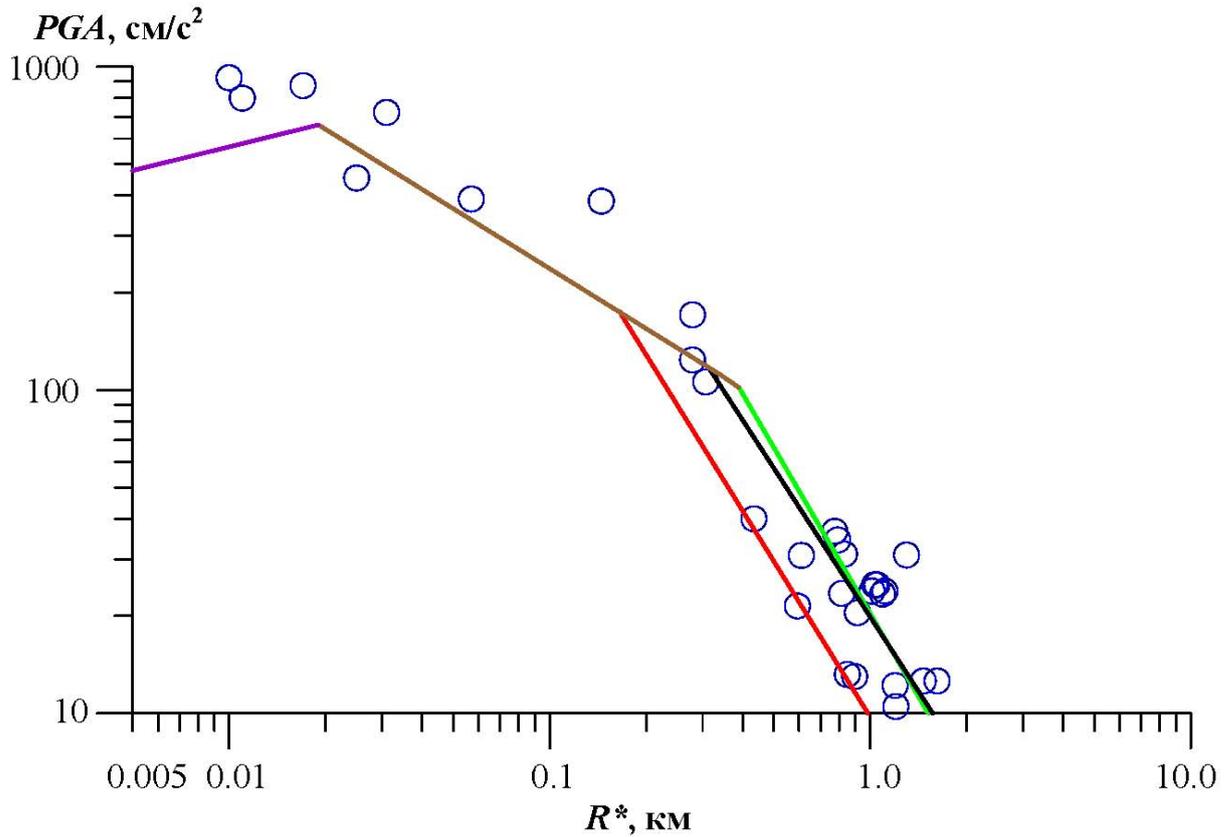
$$\lg (PGA, \text{ см/с}^2) = 1.30 - 1.53 \lg R^* \pm 0.10. \quad (3.14)$$

Соответствующая линия показана на рисунке 3.9 черным цветом. На этом же рисунке показаны участки кривой затухания по мировым данным для грунтов I и III – IV категорий (линии красного и зеленого цвета соответственно).

Как видим, эмпирические данные ограничены линией для скальных грунтов. Прямая, определяемая уравнением (3.14), практически совпадает со среднестатистической линией для грунтов III – IV категорий. Несмотря на то, что категория грунтов не учитывалась, разброс данных характеризуется стандартным отклонением всего 0.10 ед. десятичного логарифма.

Таблица 3.5 - Землетрясения Ирана и параметры записей сильных движений грунта, не использовавшиеся при выводе уравнений затухания

Дата	Станция	$M_S$	Механизм очага	$R$ , км	$R^*$	$PGA$ , см/с <sup>2</sup>
20.06.94	Zanjiran	5.9	взброс	3.0	0.017	875
20.06.94	Naghan	6.0	взброс	3.0	0.031	722
26.12.03	Bam	6.8	сдвиг	2.0	0.011	800
26.12.03	Abaraq	6.8	сдвиг	48.98	0.279	171
26.12.03	Mohabad	6.8	сдвиг	48.98	0.279	124
26.12.03	Jiroft	6.8	сдвиг	76.03	0.434	40
26.12.03	Joshan	6.8	сдвиг	136.14	0.776	36.6
26.12.03	Andoohjerd	6.8	сдвиг	139	0.793	34.4
26.12.03	Sirch	6.8	сдвиг	145.9	0.832	31.1
26.12.03	Golbaf	6.8	сдвиг	106.9	0.610	30.8
26.12.03	Kereman 2	6.8	сдвиг	228.0	1.300	30.9
26.12.03	Kerman 1	6.8	сдвиг	184.07	1.050	25
26.12.03	Quale Gan	6.8	сдвиг	181.13	1.033	25
26.12.03	Nosrat	6.8	сдвиг	177.83	1.014	23.9
26.12.03	Kahnooj	6.8	сдвиг	142.89	0.815	23.5
26.12.03	Cheshme Sabz	6.8	сдвиг	191.87	1.094	23.4
26.12.03	Rayen	6.8	сдвиг	103.99	0.593	21.5
26.12.03	Shahdad	6.8	сдвиг	159.96	0.912	20.5
26.12.03	Bardsir	6.8	сдвиг	194.98	1.112	23.9
26.12.03	Mahan	6.8	сдвиг	148.94	0.849	13.2
26.12.03	Lale Zar	6.8	сдвиг	157.04	0.895	13.0
26.12.03	Ravar	6.8	сдвиг	283.79	1.618	12.6
26.12.03	Zarand	6.8	сдвиг	257.04	1.466	12.6
26.12.03	Horjand	6.8	сдвиг	209.89	1.197	12.2
26.12.03	Bolvard	6.8	сдвиг	210.86	1.202	10.5
23.06.90	Abbar	7.4	взбрососдвиг	7.00	0.025	453
07.10.76	Ghain	4.0	сдвиг	3.02	0.145	384
16.09.78	Tabas	7.5	сдвиг	3.02	0.010	925
16.09.78	Ferdows	7.5	сдвиг	91.20	0.327	106
16.09.78	Dayhook	7.5	сдвиг	16.98	0.057	390



Кружки - пиковые ускорения грунта,  
 черным цветом показана кривая затухания для дальней зоны по данным местных станций; фиолетовым цветом – кривая затухания для разломной зоны, коричневым - кривая затухания для ближней зоны по формуле (3.3); красным и зеленым – кривые затухания для дальней зоны на грунтах I и III - IV категорий по формуле (3.11)

Рисунок 3.9 – Затухание пиковых ускорений грунта при землетрясениях Ирана

Аппроксимирующая прямая для ближней зоны, полученная по мировым данным, достаточно хорошо описывает распределение пиковых ускорений на этом участке. Стандартное отклонение в этой зоне не превышает 0.10 ед. десятичного логарифма. Три точки, расположенные на наименьших кратчайших расстояниях и имеющие максимальные значения ускорений, относятся к разломной зоне.

Таким образом, можно сделать вывод, что затухание ускорений в Иране также хорошо описываются среднемировыми уравнениями, полученными автором.

Рассмотрим еще один регион, Китай. Используем данные из работы [Feng et al., 2015] по записям сильных движений грунта при Венчуанском землетрясении 12.05.2008,  $M_S = 8.0$  (таблица 3.6). Механизм очага - взбросодвиг. Классификация грунтовых условий отличается от применяемых в России. Судя по описаниям, грунты в местах установки станций в большинстве случаев можно отнести ко II категории. Встречаются грунты также I и III категорий.

Таблица 3.6 – Пиковые ускорения грунта  
при Венчуанском землетрясении, 12.05.2008,  $M_S = 8.0$

<b>С/станция</b>	<b><math>R</math>, км</b>	<b><math>R^*</math>, км</b>	<b><math>PGA</math>, см/с<sup>2</sup></b>
Anxian Tashui	5.70	0.013	285.58
Baoji	287.13	0.658	118.94
Basong	348.34	0.798	127.01
Butuo EA	370.32	0.848	12.07
Butuotuoju	386.97	0.886	10.09
Baoxing EA	97.51	0.223	76.549
Baoxing Minzhi	83.62	0.192	148.51
Baoxing Yanjing	78.39	0.180	185.98
Caotan	463.32	1.061	54.16
Chengdu Zhonghe	80.42	0.184	76.95
Changan	443.4	1.016	20.169
Chen Chuangc Chenchuang	313.63	0.718	105.47
Chenjing	421.43	0.965	12.03
Changning	312.09	0.715	47.25
Cuijiaya	412.99	0.946	15.10
Changqiqixiangju	118.96	0.273	181.03

Продолжение

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Datong	481.5	1.103	15.71
Dangchuang	176.35	0.404	82.657
Dechangnongkeju	421.39	0.965	10.43
Dingyuan	388.73	0.891	14.36
EA	403.77	0.925	20.732
Dongshan	442.76	1.014	14.881
Deyang Baima	38.64	0.089	131.09
Dayiyinping	43.47	0.100	136.74
Er Tong Gongyuan	405.99	0.930	17.02
Fengxiang	323.45	0.741	76.01
Fushubanqiao	253.05	0.580	31.50
Ganyanchi	415.9	0.953	25.30
Gaoling	483.73	1.108	61.358
Guanxiang	408.32	0.935	14.02
Guyuan	390.94	0.896	32.23
Guanyuan Shijing	81.43	0.187	315.58
Guanyuan Zengjia	98.17	0.225	415.85
Haiyuan	410.19	0.940	21.352
Heping	391.92	0.898	43.272
Hezui	458.96	1.051	10.90
Hongcheng	466.41	1.069	12.01
Heishuidiban	90.3	0.207	99.86
Heishuishuangliusuo	71.4	0.164	140.09
Huxian	416.29	0.954	88.974
Hongya	118.84	0.273	138.79
Hanyuanjiuniang	188.48	0.432	81.277

Продолжение

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Hanyuanqingxi	179.83	0.412	136.02
Hanyuanwusihe	203.98	0.468	62.28
Hanyuanyidong	184.03	0.422	81.03
Hezuo	358.78	0.822	10.056
Jingning	327.94	0.751	14.36
Jingyang	459.18	1.052	55.15
JinYa	392	0.898	20.43
Jiulong	308.2	0.706	16.56
Junlian	332.65	0.762	17.824
Jiulong Naiju	314.91	0.721	24.82
Jiangyou Chonghua	33.06	0.076	287.86
Jiangyou EA	23.5	0.054	497.60
Jiangyouhangezeng	15.05	0.034	495.28
Jiuzai baihe	133.1	0.305	108.94
Jiuzai guoyuan	100.12	0.229	236.69
Jiuzai yongfeng	115.26	0.264	97.536
Jiuzai wujiao	100.82	0.231	170.59
Jiuzai zhangzha	153.67	0.352	286.86
Kangding	193.92	0.444	33.336
Kangle	341.44	0.782	15.52
Lantian	489.65	1.122	48.528
Leibohuangliang	283.29	0.649	26.093
Leiboxian EA	302.22	0.692	13.36
Ludingdetuo	209.31	0.480	109.65
Ludingjiajun	198.94	0.456	57.285
Ludinglengzi	189.5	0.434	117.97

Продолжение

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Ludingshuichang	179.64	0.412	49.659
Lintong	486.4	1.114	56.29
Liujiabao	416.5	0.954	15.63
Longxian	313.01	0.717	151.39
Lushanfenghe	116.52	0.267	88.54
Leshanjinkouhe	196.33	0.450	108.08
Lushanjishengju	107.8	0.247	113.81
Lushanxianfeixianguan	116.91	0.268	121.26
Lintan	299.77	0.687	10.453
Ludian	422.18	0.967	13.79
Lixianmuka	21.79	0.050	308.92
Lixianshaba	49.71	0.114	244.6
Lixiangtaoping	13.81	0.032	339.83
Mabiandiban	238.71	0.547	41.83
Muchuanlidian	225.77	0.517	96.39
Maerkangdiban	136.66	0.313	26.69
Maerkangzuokeji	128.25	0.294	57.75
Mianningju	305.17	0.699	17.605
Ninhe	480.45	1.101	13.17
MianningCaogu	290.17	0.665	47.016
Mianninghuian	299.23	0.685	26.775
Mianninghuilong	318.28	0.729	22.107
MianningLugu	327.56	0.750	41.11
Mianning Nanshuiwan	340.05	0.779	21.547
Mianningzeyuan	344.94	0.790	17.79
Mingshan	106.05	0.243	169.32

*Продолжение*

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Mulan	433.03	0.992	18.063
Minxian	233.56	0.535	68.30
Maoxiandiban	0.3	0.001	300.03
Maoxiandiexi	42.59	0.098	241.38
Maoxian Nanxin	0.3	0.001	421.67
Miyipanlian	478.23	1.096	10.534
Mianzhu Qingping	0.3	0.001	823.11
Pingan	442.4	1.013	14.44
Pujiangdaxing	80.81	0.185	191.67
Pujiangwuxing	78.68	0.180	99.454
Puerzhen	314.12	0.720	12.018
Pingwumuzuo	43.85	0.1080	273.45
Pixianzoushishan	26.42	0.061	137.99
Qianling	435.04	0.997	21.607
Qianyang	314.1	0.720	57.03
Qingshuixiang	495.44	1.135	10.45
Qingshuiyi	369.78	0.847	17.92
Qishan	342.85	0.785	76.657
Qiyang	415.74	0.952	34.616
Honglaiyouzha	65.43	0.150	193.78
Rongjingshilong	137.08	0.314	114.83
Shifangbajiao	8.5	0.019	571.96
Shoushanxiang	345.71	0.792	14.922
Shimiancaoke	231.14	0.530	41.22
Shimiancaluo	239.71	0.549	100.96
Shimianliziping	255.37	0.582	48.78

*Продолжение*

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Shimianmeiluo	218.73	0.501	82.471
Shimianwajiao	218.55	0.501	92.023
Shimianxianfeng	229.97	0.527	79.541
Songpan	102.19	0.234	38.86
Songpananhong	87.82	0.201	181.63
Songpachuanzhushi	113.61	0.260	40.189
Suijiang	269.6	0.617	20.84
Shawan	130.92	0.300	107.31
Shuizhu	338.38	0.775	14.25
Tangyu	346.37	0.793	29.644
Tongxin	485.91	1.113	24.72
Tianquanxianlianglu	165.89	0.380	119.53
Tianshui	220.55	0.505	127.69
Tuanzhuang	445.7	1.021	12.82
Wenchuan Wolong	23.31	0.053	931.80
Wudu	79.49	0.182	181.31
Wenxian	74.17	0.170	108.87
Xichangchuanxing	368.39	0.844	28.507
Xichanghuangshui	401.44	0.920	10.277
Xichanglizhou	355.25	0.814	21.382
Xichangxincun	372.04	0.852	43.087
Xichangyoujun	387.89	0.889	18.54
Xichangzhouju	367.25	0.841	24.588
Xideguangming School	318.32	0.729	17.35
Xidemianshan	316.42	0.725	31.21
Xi'an	454.29	1.041	52.40

Продолжение

<b>С/станция</b>	<b>R, км</b>	<b>R*, км</b>	<b>PGA, см/с<sup>2</sup></b>
Xianyang	436.02	0.999	49.984
Xiaokangying	365.93	0.839	17.285
Xicao	458.19	1.050	12.528
Xigu	416.93	0.955	19.03
Xiji	327.46	0.750	56.37
Xiying	456.77	1.047	47.687
Xiaojin Diban	106.86	0.245	71.794
Xiaojin Dawei	79.79	0.183	129.85
Xinjinlihua	76.98	0.176	106.11
Yaandizhentai	121.61	0.279	138.3
Yangling	371.16	0.850	90.11
Yaanshaping	135.38	0.310	99.32
Yibinyongxing	248.83	0.570	35.03
Yinshan	379.73	0.870	12.33
Yeliguan	304.75	0.698	11.117
Yongjing	421.78	0.966	11.42
Yongshan	305.91	0.701	15.97
Yuexixinmin	272.07	0.623	75.175
Yuexizhongsuo	286.1	0.655	51.59
Yanyuanjinhe	398.75	0.913	11.082
Yanyuanweicheng	440.34	1.009	10.86
Zigongdixingyingxiang-taizhen0	232.26	0.532	53.94
Zigongdixingyingxiang-taizhen1	232.26	0.532	26.225
Zigongdixingyingxiang-taizhen2	232.26	0.532	29.715
Zigongdixingyingxiang-taizhen3	231.6	0.531	34.22
Zigongdixingyingxiang-taizhen4	231.6	0.531	31.931

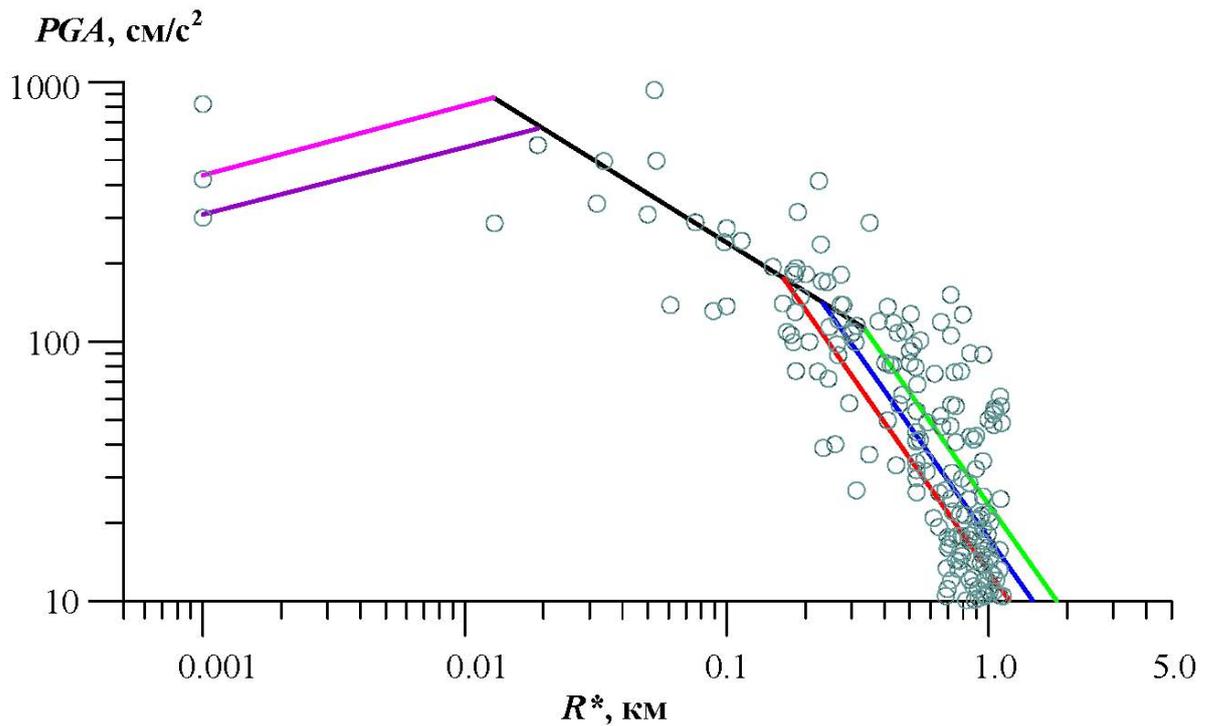
Окончание

С/станция	$R$ , км	$R^*$ , км	$PGA$ , см/с <sup>2</sup>
Zigongdixingyingxiang-taizhen5	231.6	0.531	41.447
Zigongdixingyingxiang-taizhen6	231.6	0.531	41.336
Zigongdixingyingxiang-taizhen7	231.6	0.531	44.769
Zhonghe	424.85	0.973	10.55
Zhongpu	382.05	0.875	11.38
Zhongxinxiang	434.89	0.996	16.10
Zhouzhi	383.78	0.879	41.92
Zhaojue Qixiangju	335.89	0.769	13.27
Zhuoni	282.17	0.646	19.254
Zhouqu	152.98	0.350	36.667

Эмпирические данные представлены на рисунке 3.10. Отметим, что диапазон расстояний  $R^*$  ограничен значением  $R^* \leq 1.25$  км, в результате чего значения пиковых ускорений менее 40 см/с<sup>2</sup> становятся непредставительными. К тому же, оценка кратчайших расстояний затруднена наличием большого количества разломов, параллельных магистральному, и оперяющих разломов.

Нанесенные на график среднестатистические кривые затухания, рассчитанные по формулам (3.3) и (3.11), тем не менее, показывают хорошую согласованность с эмпирическими данными. Стандартные отклонения равны для ближней зоны  $\sigma = 0.14$  ед. десятичного логарифма, для дальней зоны  $\sigma = 0.20$  ед. десятичного логарифма.

На рисунке показаны также участки среднемировой кривой затухания для сдвигов (фиолетовая линия) и взбросов (розовая линия) в разломной зоне, поскольку механизм данного землетрясения относится к взбрососдвиговому типу. Немногочисленные данные этой зоны не противоречат среднемировым оценкам затухания.



Кружки – пиковые ускорения грунта.

Участки кривой затухания по мировым данным:

разломная зона - розовая линия для взбросов и сиреневая линия для сдвигов;

ближняя зона - черная линия;

дальняя зона – красная линия для грунтов I категории, синяя - для грунтов II

категории, зеленая для грунтов III и IV категорий

Рисунок 3.10 – Расположение эмпирических данных по Венчуанскому землетрясению 2008 г. на полученных кривых затухания

Из рисунка 3.10 видно, что затухание ускорений в этом регионе также может быть описано уравнениями затухания, полученными в работе.

Таким образом, полученные среднемировые соотношения затухания применимы для разных районов и землетрясений разных магнитуд.

Соответствующие численные коэффициенты региональных уравнений затухания несколько отличаются друг от друга и от среднемировых. Но оценки амплитуд не выходят за пределы стандартных отклонений, соответствующих среднемировой кривой затухания. Однородность данных и компактность района

исследований способствуют уменьшению величин стандартных отклонений региональных уравнений. Различия кривых затухания проявляются в разломной области и на прилегающем участке ближней зоны, где уровни пиковых ускорений определяются в основном механизмом очага. Различия, проявляющиеся в дальней зоне, определяются грунтовыми условиями в точке регистрации и магнитудой землетрясения.

Однако, несмотря на различия региональных законов затухания, во всех случаях надежно выделяются три зоны с существенно разными законами затухания. Следовательно, можно сделать вывод, что установленные закономерности распространения 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 в виде 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. Избыток данных в одной из зон определяет наклон кривой затухания.

### **3.2 Соотношение пиковых амплитуд различных компонент ускорений грунта**

Рассмотрим проблему соотношения амплитуд грунта на различных компонентах. Поскольку наибольшее число исследований посвящено именно пиковому ускорению грунта, то важность этой задачи очевидна, особенно при прогнозе уровня различных компонент [Аптикаев, Эртелева, 2008б; Эртелева, 2011].

#### **3.2.1 Отношение амплитуд ускорений грунта на горизонтальных компонентах**

Прежде всего, рассмотрим влияние различных факторов на уровень второй горизонтальной компоненты.

На рисунке 3.11 показана разница логарифмов амплитуд между двумя ранжированными ортогональными горизонтальными компонентами (отношение пикового ускорения более интенсивной компоненты ( $PGA_{H_{\max}}$ ) к пиковому

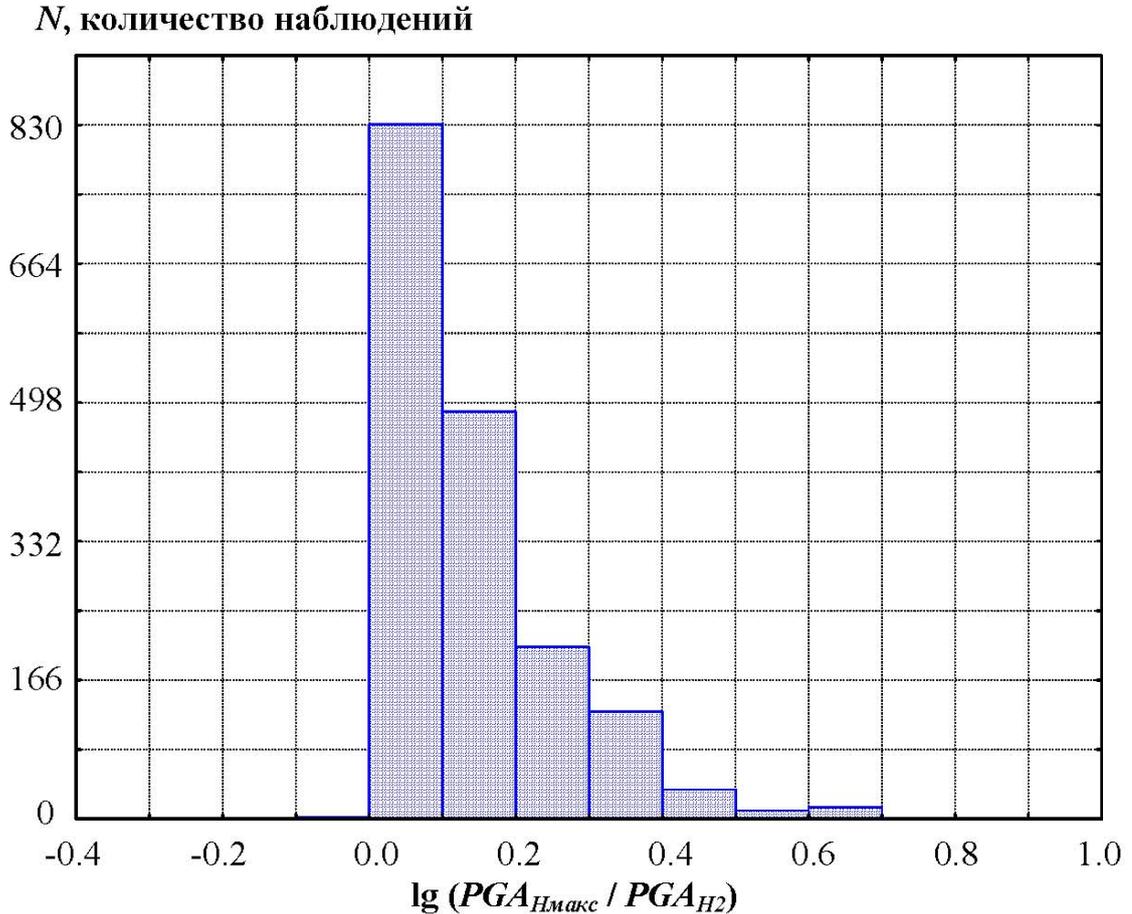


Рисунок 3.11 - Распределение отношений ранжированных горизонтальных ускорений  $\lg (PGA_{H_{\max}} / PGA_{H2})$  (1719 событий)

ускорению второй горизонтальной ( $PGA_{H2}$ ) для совокупности всех имеющихся акселерограмм, позволяющих проводить измерения с точностью не менее трех знаков. Среднее значение ранжированного отношения горизонтальных компонент без учета каких-либо факторов равно 1.32. С вероятностью 67% это отношение не превысит 1.5. Если учесть, что все отклонения от среднего откладываются в одну сторону, то распределение отношений уровней двух неранжированных ортогональных горизонтальных компонент подчиняется логнормальному закону с нулевым средним значением и стандартным отклонением 0.15 ед. десятичного

логарифма.

Из графика следует, что в среднем амплитуды на двух случайно ориентированных горизонтальных компонентах равны. Таким образом, распространенный за рубежом способ задания уровня горизонтальной компоненты ожидаемым среднегеометрическим значением, имеет под собой статистическое обоснование. Среднегеометрическое значение двух горизонтальных компонент всего на 13% ниже максимального значения, что значительно меньше погрешности оценки уровня: стандартное отклонение оценки амплитуды составляет около 45%.

Отношение ускорений на двух ортогональных горизонтальных компонентах имеет вид:

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{H2}) = 0.18 - 0.09 \lg R + 0.001 M \pm 0.11, \quad (3.15)$$

где  $R$  – гипоцентральное расстояние.

Как видно, зависимость отношения ускорений на двух горизонтальных компонентах слабо зависит от расстояния и практически не зависит от магнитуды: Таким образом, с расстоянием различие между уровнями двух горизонтальных компонент несколько уменьшается. Напомним, что рассматривается только эпицентральная область.

Сравнение влияния расстояния на соотношение уровней горизонтальных компонент с погрешностью оценки самих амплитуд показывает, что для практических нужд влиянием расстояния можно пренебречь.

### 3.2.2 Зависимости отношения амплитуд ускорений грунта на вертикальной и горизонтальной компонентах от различных факторов

Величина отношения уровней вертикальной и горизонтальной компонент весьма важна при расчетах сооружений на сейсмостойкость. В строительных нормах значение этого параметра берется средним для всех интенсивностей.

#### 3.2.2.1 Влияние уровня колебаний грунта

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

$$PGA_{\text{верт}} = 44 + 0.0147PGA_{H\max} + 0.0011PGA_{H\max}^2 \text{ при } PGA_{H\max} > 250 \text{ см/с}^2, \quad (3.16)$$

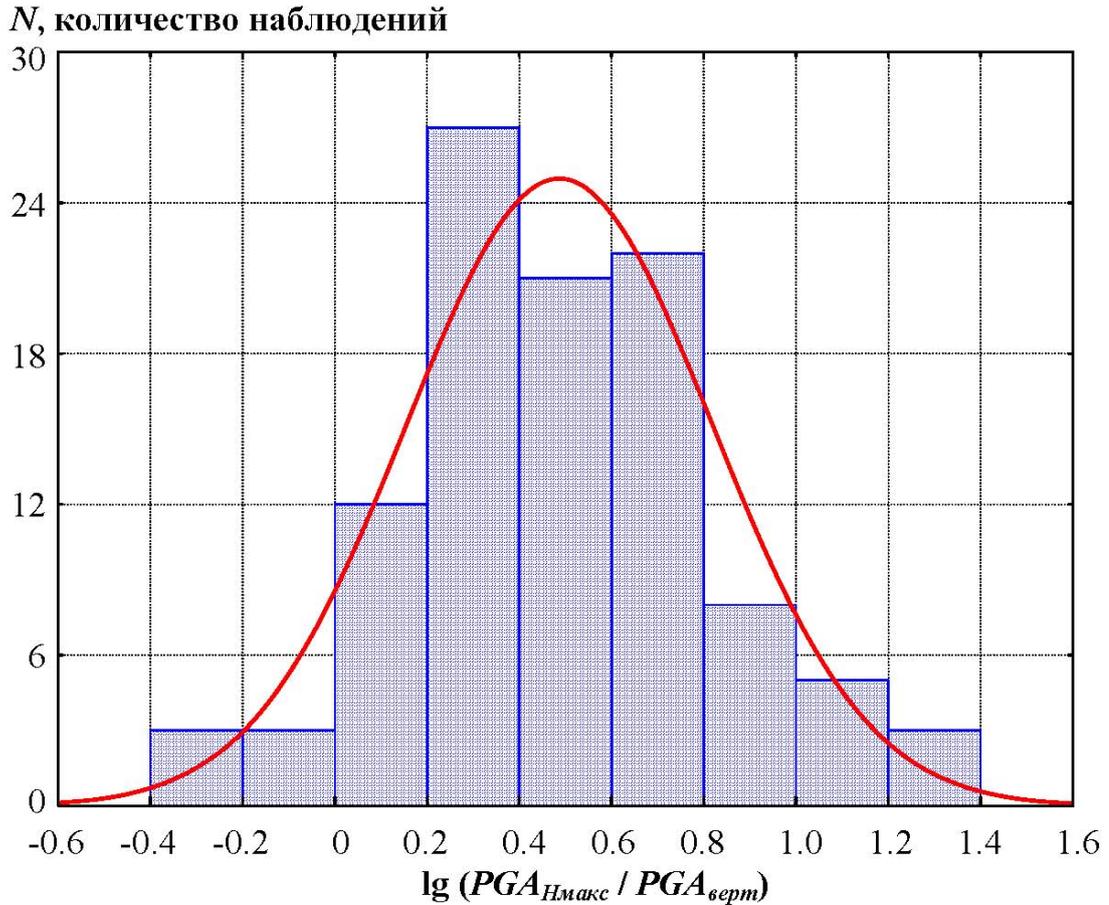
где  $PGA_{H\max}$  - пиковое ускорение на наиболее интенсивной горизонтальной компоненте,  $\text{см/с}^2$ ;

$PGA_{\text{верт}}$  - ускорение на вертикальной компоненте,  $\text{см/с}^2$ .

Полученные результаты являются практически совпадающими с результатами других авторов [Mikhailova, Artikaev, 1996], полученными ранее. Учитывая, что были использованы различные выборки данных, установленные особенности исследованной зависимости можно считать устойчивыми. Следовательно, уровень колебаний - фактор, бесспорно определяющий соотношение между горизонтальной и вертикальной компонентами.

### 3.2.2.2 Влияние расстояния и магнитуды

Для повышения надежности результатов, ограничимся выборкой данных для  $I > 7$ . На рисунке 3.12 показано распределение искомой величины для эпицентральных расстояний до 12.5 км.



Выборка  $I > 7.0$ ,  $R \leq 12.5$  км, 104 события. Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.49 \pm 0.33$

Рисунок 3.12 - Распределение логарифма отношений вертикального и максимального горизонтального ускорений грунта

Для 104 землетрясений отношение амплитуд ускорений на вертикальной и горизонтальной компонентах оценивается как  $0.49 \pm 0.33$ . В следующем диапазоне расстояний от 12.5 км до 30 км для 107 землетрясений наблюдается существенное понижение значения соответствующей оценки – до  $0.29 \pm 0.23$ . В

диапазоне расстояний от 30 км до 50 км для 92 землетрясений отношение амплитуд вновь повышается – до  $0.43 \pm 0.22$ .

На расстояниях от 50 до 160 км для 113 землетрясений получено значение  $0.43 \pm 0.23$ .

Как видно, для фиксированного значения интенсивности исследуемое соотношение не зависит от расстояния.

Учитывая, что, как было установлено в пункте 3.2.2.1, в группе  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ , отношение  $PGA_{\text{верт}} / PGA_{H\max}$  практически не зависит от уровня колебаний, для исследования зависимости исследуемого отношения от расстояния были выбраны все записи этой группы (472 события). Так же, как и в работе [Аптикаев, Эртелева, 2008б], никакой значительной зависимости от гипоцентрального расстояния обнаружено не было, коэффициент корреляции в данном случае составил всего лишь  $r = 0.08$ . Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) = 0.47 - 0.004 \lg R \pm 0.27. \quad (3.17)$$

При использовании в качестве меры расстояния кратчайшего расстояния  $R_{кр}$  между пунктом регистрации и поверхностью разлома коэффициент корреляции не меняется, а уравнение принимает вид:

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) = 0.342 + 0.0003 \lg R_{кр} \pm 0.24. \quad (3.18)$$

Коэффициент корреляции зависимости  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}$  от магнитуды по той же выборке низкий  $r = -0.14$ . Но этого и следовало ожидать, потому что исследуемое соотношение безразмерно, а, следовательно, не зависит от энергии (магнитуды). Корреляционное уравнение имеет вид:

$$\lg (PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) = 0.55 - 0.03 M_S \pm 0.25. \quad (3.19)$$

Итак, не обнаружено значимой зависимости отношения амплитуд ускорений на горизонтальной и вертикальной компонентах от расстояния и магнитуды.

### 3.2.2.3 Влияние типа грунта

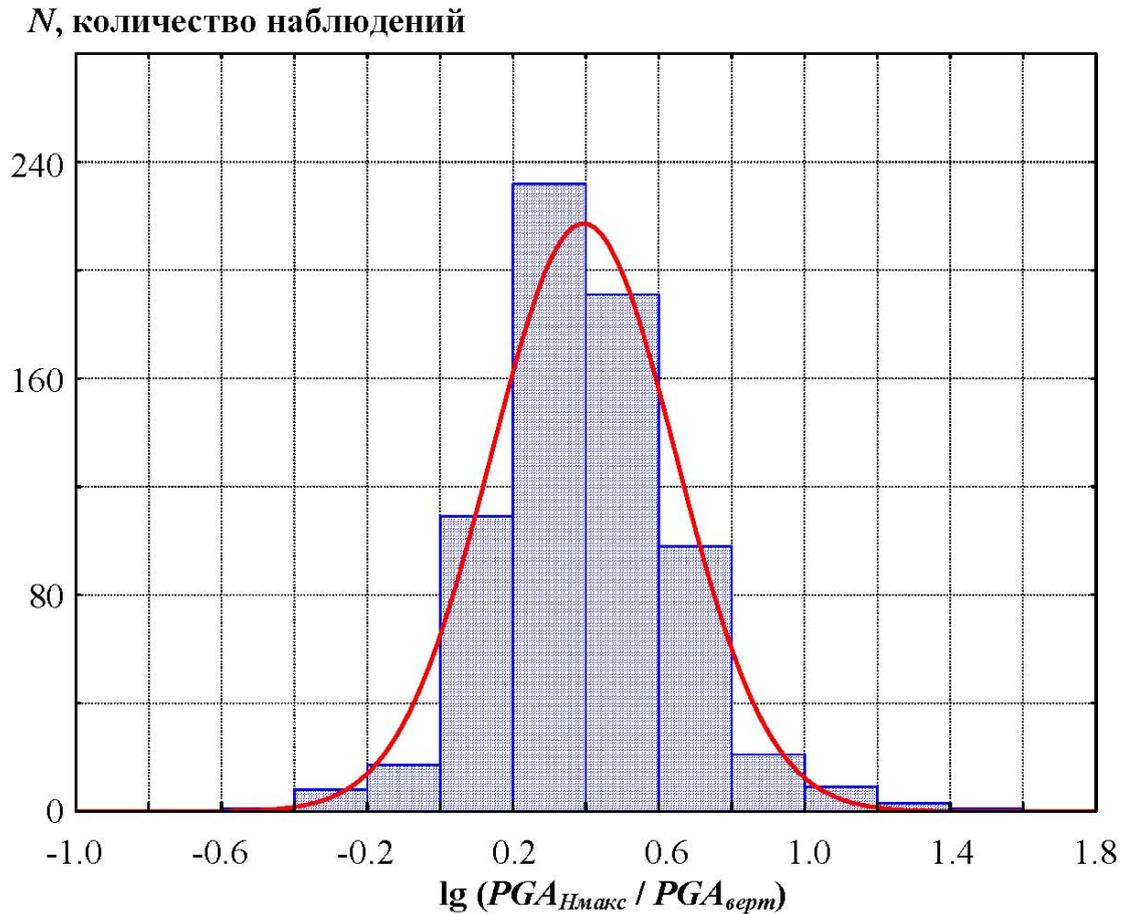
В соответствии с результатами, полученными в пункте 3.2.2.1, при исследовании зависимости отношения  $PGA_{H\text{макс}} / PGA_{\text{верт}}$  от различных факторов отдельно рассматривались записи с пиковым ускорением грунта на более интенсивной горизонтальной компоненте  $PGA_{H\text{макс}} \leq 250 \text{ см/с}^2$  (где отношение не зависит от уровня колебаний) и записи, для которых  $PGA_{H\text{макс}} > 250 \text{ см/с}^2$  [Эртелева, 2011]. Во второй группе записей предварительно необходимо исключить влияние уровня колебаний. С этой целью была использована разность между наблюдаемым вертикальным ускорением  $PGA_{\text{набл}}$  и рассчитанным с использованием уравнения (3.16) значением вертикального ускорения  $PGA_{\text{расч}}$  (или иначе  $\lg(PGA_{\text{набл}} / PGA_{\text{расч}})$ ). Результирующее значение рассматривалось как функция различных факторов.

Поскольку для многих записей, полученных за рубежом, имеется лишь указание на происхождение грунтов (например, аллювий), пришлось разделить грунты на два типа: рыхлые и скальные. В группу рыхлых отнесены все грунты, кроме грунтов I категории, а также грунты, определенные как “аллювий”.

Сначала рассматривался простейший случай – равенство горизонтальных ускорений, были выбраны землетрясения с интенсивностью  $I > 7$  для всех расстояний (следовательно, расстояния также косвенно ограничены условием  $I > 7$ ).

Для скальных грунтов по 80 землетрясениям получено распределение величины  $\lg(PGA_{H\text{макс}} / PGA_{\text{верт}})$ , близкое к нормальному, с параметрами  $0.28 \pm 0.21$ . Для рыхлых грунтов по 690 землетрясениям получено распределение, близкое к нормальному, с параметрами  $0.39 \pm 0.25$  (рисунок 3.13). Здесь не учтено

влияние уровня колебаний, вследствие чего оценки стандартных отклонений завышены.



Выборка землетрясений  $I > 7.0$ , 690 событий. Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.39 \pm 0.25$

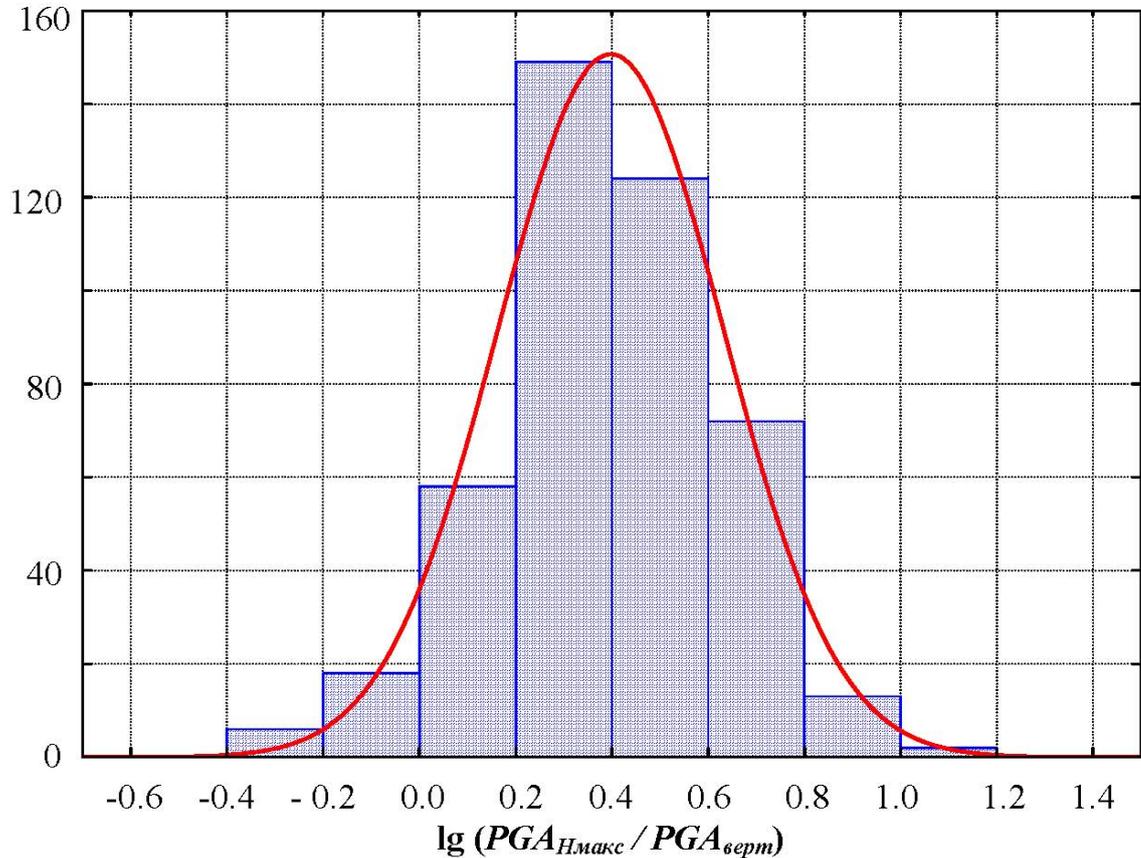
Рисунок 3.13 - Распределение логарифмов отношений максимального горизонтального и вертикального ускорений для рыхлых грунтов

Таким образом, можно считать, 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.

Затем все данные были проанализированы по двум группам в зависимости от уровня более интенсивной горизонтальной компоненты, как это было описано

выше. Для примера на рисунке 3.14 показано распределение  $\lg(PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}})$  для рыхлых грунтов по выборке из 406 событий группы с  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ .

$N$ , количество наблюдений



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.33 \pm 0.20$

Рисунок 3.14 - Распределение логарифмов отношений максимального горизонтального и вертикального ускорений для рыхлых грунтов (406 событий с  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ )

В таблице 3.7 приведены параметры нормального распределения зависимости  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}$  от типа грунта при  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ , а в таблице 3.8 – результаты анализа для группы записей с  $PGA_{H\max} > 250 \text{ см/с}^2$ .

Как видно из таблицы 3.7, среднее значение  $\lg(PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}) \approx 0.3$  для любого типа грунта или  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}} \approx 2$ . Таким образом, соотношение  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}}$  определяется уровнем колебаний и не зависит от типа грунта.

Таблица 3.7 - Параметры нормального распределения зависимости отношения  $\lg(PGA_{H\max} / PGA_{верт})$  от типа грунта ( $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ )

Тип грунта	Кол-во событий	Среднее значение $\lg(PGA_{H\max} / PGA_{верт})$	Стандартное отклонение
Скальные	182	0.39	0.24
Рыхлые	406	0.33	0.20

Таблица 3.8 - Параметры нормального распределения для величины  $\lg(PGA_{набл} / PGA_{расч})$  в зависимости от типа грунта ( $PGA_{H\max} > 250 \text{ см/сек}^2$ )

Тип грунта	Кол-во событий	Среднее значение $\lg(PGA_{набл} / PGA_{расч})$	Стандартное отклонение
Скальные	30	0.03	0.24
Рыхлые	79	0.03	0.25

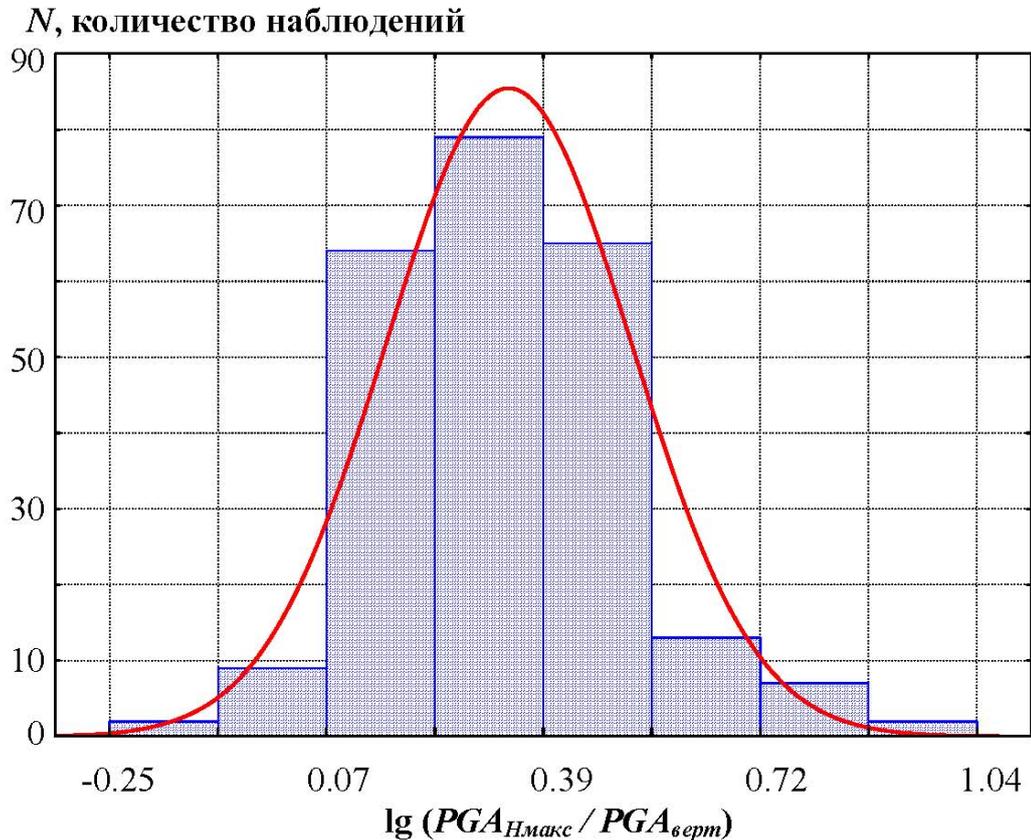
Для второй группы записей (см. таблицу 3.8) отклонение значения  $\sigma(PGA) = \lg(PGA_{набл} / PGA_{расч})$  от среднего (расчетного) значения очень мало по сравнению со стандартным отклонением. Таким образом, и для этой группы не наблюдается зависимости соотношения уровней горизонтальной и вертикальной компонент от типа грунта.

### 3.2.2.4 Влияние механизма очага

Данных о типе подвижек в очагах мало. Например, даже для расширенной выборки данных с  $I > 6.5$  практически отсутствует информация по землетрясениям типа взбросов и надвигов. Поэтому первая выборка состоит из землетрясений типа взбросы, надвиги и взбрососдвиги. Очагов последнего типа больше всего. Во вторую выборку включены землетрясения с механизмами типа сдвигов, в третью выборку - сбросы и сбрососдвиги. Кроме того, данные по

слабым ( $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$ ) и сильным ( $PGA_{Hmax} > 250 \text{ см/с}^2$ ) колебания рассматривались отдельно в каждой группе механизмов [Эртелева, 2011].

Для слабых колебаний (рисунок 3.15) среднее значение и стандартное отклонение распределения отношения амплитуд на вертикальной и

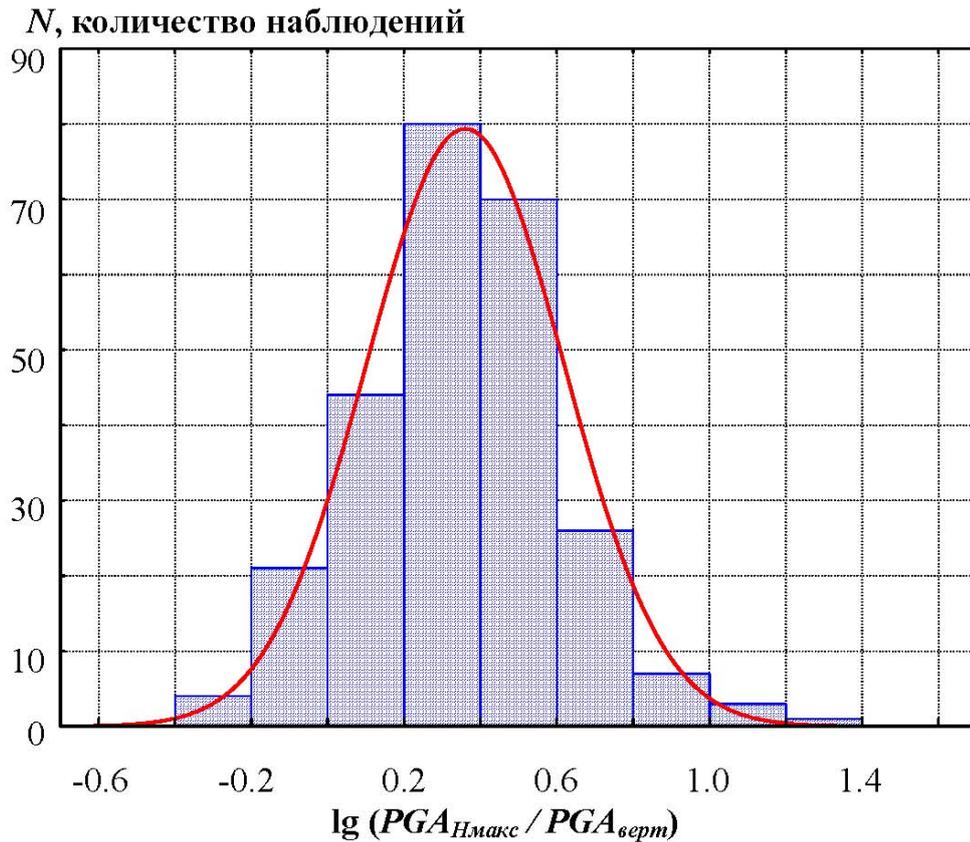


Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.34 \pm 0.18$

Рисунок 3.15 - Эмпирическое распределение  $\lg (PGA_{Hmax} / PGA_{vert})$  для механизмов взбросового типа (215 событий,  $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$ )

горизонтальной компонентах для 215 землетрясений взбросового типа равны  $0.34 \pm 0.18$ .

Распределение отношений для 249 землетрясений сдвигового типа (рисунок 3.16) имеет среднее значение и стандартное отклонение, соответственно,  $0.34 \pm 0.26$ , а для землетрясений типа сбросов и сбрососдвигов (88 событий)  $0.30 \pm 0.19$ .



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.34 \pm 0.26$

Рисунок 3.16 - Эмпирическое распределение  $\lg(PGA_{Hmax} / PGA_{vert})$  для сдвигов (249 событий,  $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$ )

Результаты анализа зависимости  $PGA_{Hmax} / PGA_{vert}$  от типа механизма очага при  $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$  приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Параметры нормального распределения значения  $\lg(PGA_{Hmax} / PGA_{vert})$  в зависимости от механизма очага ( $PGA_{Hmax} \leq 250 \text{ см/с}^2$ )

Механизм очага	Кол-во событий	Среднее значение $\lg(PGA_{Hmax} / PGA_{vert})$	Стандартное отклонение
Взброс	215	0.34	0.18
Сдвиг	249	0.34	0.26
Сброс	88	0.30	0.19

Как видно из таблицы 3.9, по-прежнему  $PGA_{Hmax} / PGA_{верт} \approx 2$ . Таким образом, при слабых колебаниях зависимость отношения ускорений на вертикальной и горизонтальной компонентах от типа подвижки в очаге оказалась весьма слабой. Во всяком случае, бытующее представление о влиянии типа подвижки на соотношение уровней вертикальной и горизонтальной компонент оказалось неверным.

Для колебаний с  $PGA_{Hmax} > 250 \text{ см/с}^2$ , зависимость от типа механизма очага изучалась с использованием разности между наблюдаемым и рассчитанным с помощью уравнения (3.10) значениями вертикального ускорения. Полученные результаты приведены в таблице 3.10, из которой видно, что  $PGA_{набл} \approx PGA_{расч}$ . Следовательно, и для этой группы колебаний изучаемое отношение определяется уровнем колебаний и не зависит типа механизма очага.

Таблица 3.10 - Параметры нормального распределения для отношения  $\lg(PGA_{набл}/PGA_{расч})$  в зависимости от типа механизма очага ( $PGA_{Hmax} > 250 \text{ см/с}^2$ )

Механизм очага	Кол-во событий	Среднее значение $\lg(PGA_{набл} / PGA_{расч})$	Стандартное отклонение
Взброс	97	0.01	0.21
Сдвиг	43	0.01	0.29
Сброс	20	- 0.04	0.18

Распределение для всех данных из группы колебаний с  $PGA_{Hmax} > 250 \text{ см/с}^2$  без учета расстояния, магнитуды, механизма очага и типа грунта показано на рисунке 3.17.

Такая выборка данных намного больше всех предыдущих по количеству записей (227), т.к. она включает в себя записи, полученные на грунтах II типа, и записи с механизмом очага комбинированного типа (взбрососдвиги и сбрососдвиги).

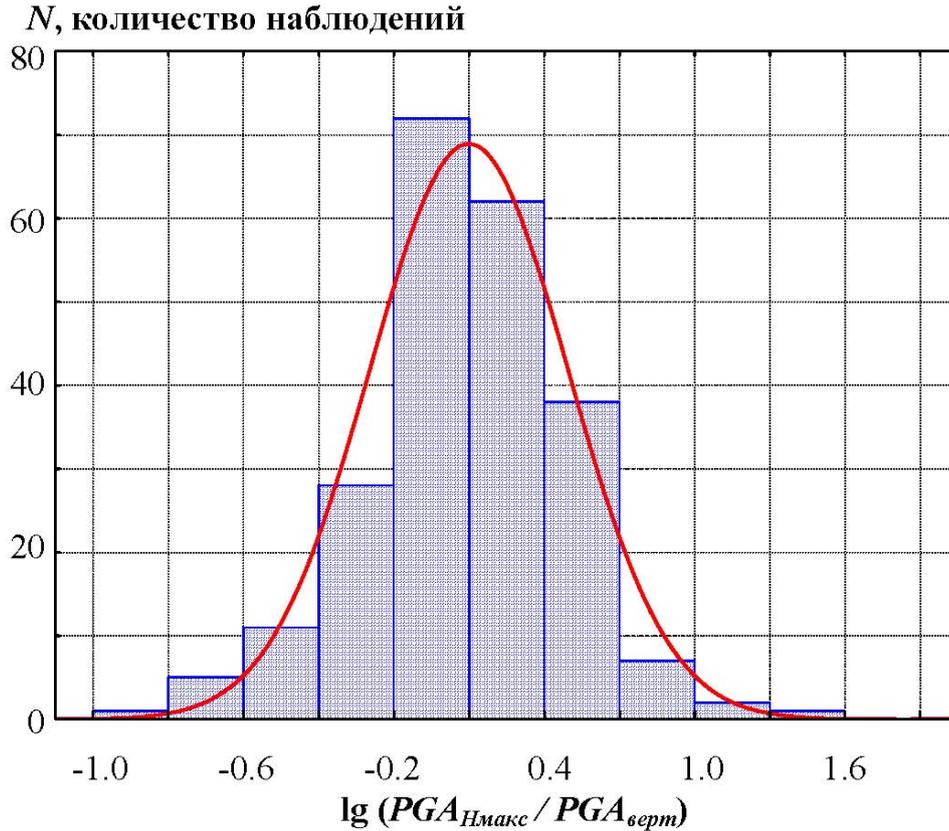


Рисунок 3.17 - Эмпирическое распределение  $\lg(PGA_{\text{набл}} / PGA_{\text{расч}})$  без учета расстояния, магнитуды, типа грунта и механизма очага (227 записей,  $PGA_{H\max} > 250 \text{ см/с}^2$ )

Для такой выборки величина стандартного отклонения такая же, как для колебаний с  $PGA_{H\max} \leq 250 \text{ см/с}^2$ . При этом, как следует из рисунка 3.16, и для такой группы данных  $PGA_{H\max} / PGA_{\text{верт}} \approx 2$ .

### 3.3 Продолжительность колебаний в ускорениях

Рассмотрим отдельно продолжительность колебаний в ближней и дальней зонах. При оценке значения продолжительности принимают во внимание влияние на нее магнитуды, расстояния и грунтовых условий. В качестве последнего будем использовать кратчайшее расстояние до поверхности разрыва для повышения точности оценок (см. главу 1).

Проанализируем данные по продолжительности колебаний в дальней зоне аналогично тому, как это было сделано при изучении затухания ускорений. Сначала организуем выборки по типу механизма очага, и в каждой полученной группе отдельно рассмотрим данные, относящиеся к разным грунтовым условиям. Построим уравнения аппроксимирующих прямых для каждой подгруппы грунтовых условий, а затем для каждой группы механизмов очага. Объединяя результаты, получаем, что продолжительность колебаний в дальней зоне может быть оценена следующим корреляционным соотношением:

$$\lg \tau = 0.17M_S + 0.5 \lg R + C_1 + C_2 - 1.43 \pm 0.30, \quad (3.20)$$

где  $M_S$  – магнитуда землетрясения;

$R$  - кратчайшее расстояние до поверхности разрыва,

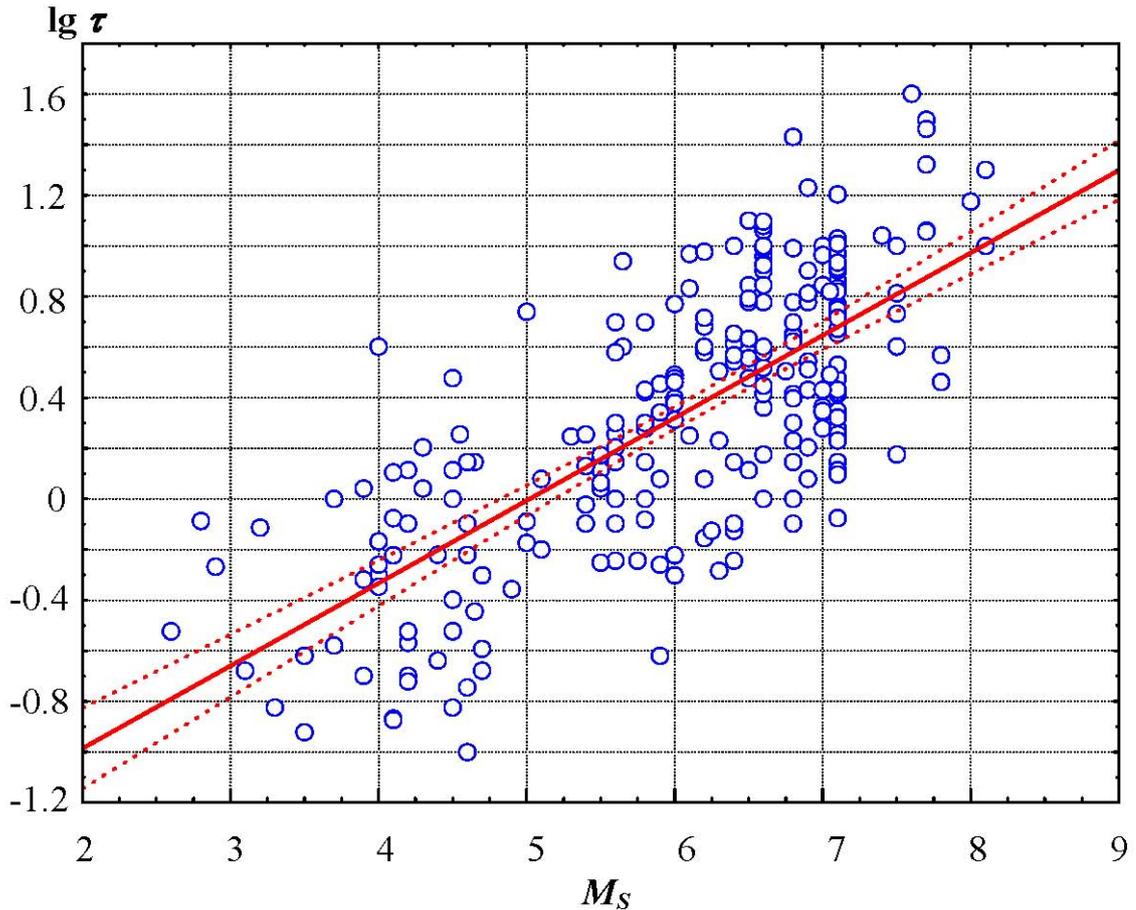
$C_1$  – постоянная, отражающая влияние механизма очага;  $C_1 = 0.25$  для сбросов,  $C_1 = 0.00$  для сдвигов и  $C_1 = -0.25$  для взбросов;

$C_2$  – постоянная, отражающая влияние грунтовых условий;  $C_2 = -0.15$  для грунтов I категории,  $C_2 = 0.00$  для грунтов II категории и  $C_2 = 0.4$  для грунтов III и IV категории.

Аналогично рассмотрим продолжительность колебаний в ближней зоне (обрабатывая данные по всем грунтам и механизмам очагов совместно). Результирующее корреляционное соотношение при этом имеет вид:

$$\lg \tau, c = 0.282 M_S - 0.012 \lg R - 1.381 \pm 0.30 \quad (3.21)$$

Как видно из полученного уравнения, зависимость от расстояния незначительна. Поэтому рассмотрим зависимость продолжительности в ближней зоне только от магнитуды. Имеющиеся эмпирические данные приведены на рисунке 3.18.



Штриховые линии - 95% доверительный интервал для аппроксимирующей линии

Рисунок 3.18 - Зависимость продолжительности колебаний в ускорениях от магнитуды в ближней зоне (264 события)

Эти данные аппроксимируются уравнением:

$$\lg \tau, c = 0.33 M_s - 1.63 \pm 0.29 \quad (3.22)$$

Напомним, что в формуле (3.22) не учтено влияние механизма очага и грунтовых условий. Оценим влияние учета грунтовых условий на значение свободного члена  $C$  уравнения (3.22), равного в общем случае  $C = -1.63$ . Для выборки данных с грунтами I категории получаем, что  $C = -1.67 \pm 0.38$ , а для грунтов III категории  $C = -1.63 \pm 0.38$ . Как видим, разница между свободным членом уравнения (3.22) и полученными оценками этой же величины для различных категорий грунта не превышает 0.04 ед. дес. логарифма, что во много

раз меньше величины стандартного отклонения оценок продолжительности. Следовательно, в ближней зоне влиянием грунтовых условий при оценке продолжительности колебаний можно пренебречь.

Аналогично оценим влияние типа механизма очага на величину продолжительности колебаний. Получаем для выборки данных с механизмом очага взброс  $C = -1.57 \pm 0.31$ , а для сбросов  $C = -1.69 \pm 0.26$ . Откуда видно, что разница между свободным членом уравнения (3.22) и полученными оценками этой же величины для различных механизмов очага не превышает 0.06 ед. десятичного логарифма, что во много раз меньше величины стандартного отклонения оценок продолжительности. Следовательно, в ближней зоне и влиянием механизма очага при оценке продолжительности колебаний можно пренебречь.

Таким образом, продолжительность колебаний в ближней зоне, в отличие от дальней зоны, определяется в основном магнитудой землетрясения.

### 3.4 Спектры ускорений

Имея дело с нормированными по уровню и преобладающей частоте спектрами, мы получаем возможность изучать не зависимость параметров спектра от очага и условий в пункте регистрации, а форму спектра, т.е. соотношения между различными параметрами спектров реакции. Обработка записей сильных движений грунта показывает, что такого рода корреляции между параметрами значительны, но некоторые из этих параметров могут быть полностью исключены из списка независимых.

Результаты, приведенные ниже, получены с использованием выборки из 1553 записей ускорений. Эмпирические распределения параметров спектров реакции (с затуханием 5%) аппроксимированы распределением Гаусса.

### 3.4.1 Преобладающий период

Значения этого параметра колебаний традиционно оцениваются в функции гипоцентрального расстояния. Однако оценки уровня амплитуд, как показали эмпирические данные, наиболее точны при использовании кратчайшего расстояния до поверхности разлома (см. главу 1), которое мы и будем использовать.

Проведя с данными по преобладающим периодам процедуру, примененную при изучении закона затухания амплитуд и продолжительности колебаний в ускорениях и описанную подробно выше (см. разделы 3.1 и 3.3), получаем, что в дальней зоне преобладающий период ускорений может быть оценен следующим уравнением:

$$\lg T = 0.17 M_S + 0.25 \lg R + C_1 + C_2 - 2.6 \pm 0.20, \quad (3.23)$$

где  $R$  – кратчайшее расстояние до поверхности разрыва,

$C_1$  – коэффициент, отражающий влияние механизма очага;  $C_1 = -0.10$  для взбросов,  $C_1 = 0.00$  для сдвигов и  $C_1 = 0.10$  для сбросов;

$C_2$  – коэффициент, отражающий влияние грунтовых условий;  $C_2 = -0.05$  для грунтов I категории,  $C_2 = 0.00$  – для грунтов II категории и  $C_2 = 0.05$  для грунтов III и IV категорий,

Заметим, что существенных изменений в оценке преобладающих периодов в дальней зоне не произошло и полученное уравнение носит уточняющий характер, см., например, [Аптикаев, Эртелева, 2012], и учитывает влияние различных факторов.

### 3.4.2 Коэффициент динамического усиления

#### 3.4.2.1 Значения коэффициентов динамического усиления для двух горизонтальных компонент

Распределение величины  $\lg \beta$  при 5% демпфировании для максимальной горизонтальной компоненты показано на рисунке 3.19 и описывается выражением (3.24):

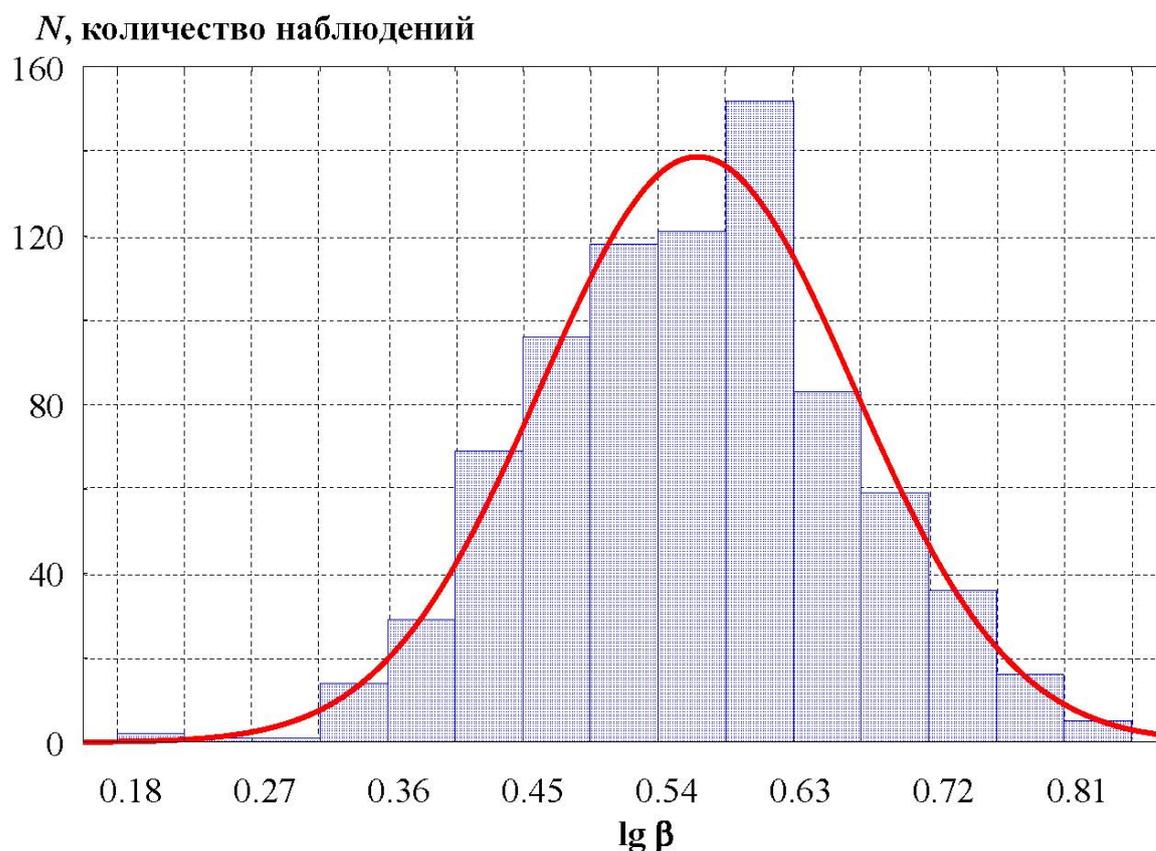


Рисунок 3.19 - Распределение логарифма коэффициента динамического усиления  $\beta$  максимальной горизонтальной компоненты (без учета магнитуды землетрясения, механизма очага, расстояния и грунтовых условий, 802 события)

$$\lg \beta = 0.56 \pm 0.10 \quad (\beta = 3.63). \quad (3.24)$$

Отметим, что в работе [Mikhailova, Artikaev, 1996] с использованием записей, полученных в США, оценка величины коэффициента динамического

усиления для 5% демпфирования составляет  $\beta = 3.5$ . Однако такой результат был получен при обработке обеих горизонтальных компонент.

Следовательно, поскольку в упомянутой работе использовались обе горизонтальные компоненты, а автором только максимальная, можно прийти к выводу, что значение  $\beta = 3.6$  характеризует более интенсивную горизонтальную компоненту, а значение  $\beta = 3.4$  – вторую горизонтальную компоненту. Эмпирическое значение стандартного отклонения при этом составляет около 26%.

#### **3.4.2.2 Зависимость коэффициента динамического усиления от типа подвижки в очаге**

Исследуем влияние на величину значения  $\beta$  механизма очага землетрясения. Для этого определим значение  $\beta$  для разных типов механизмов в отдельности.

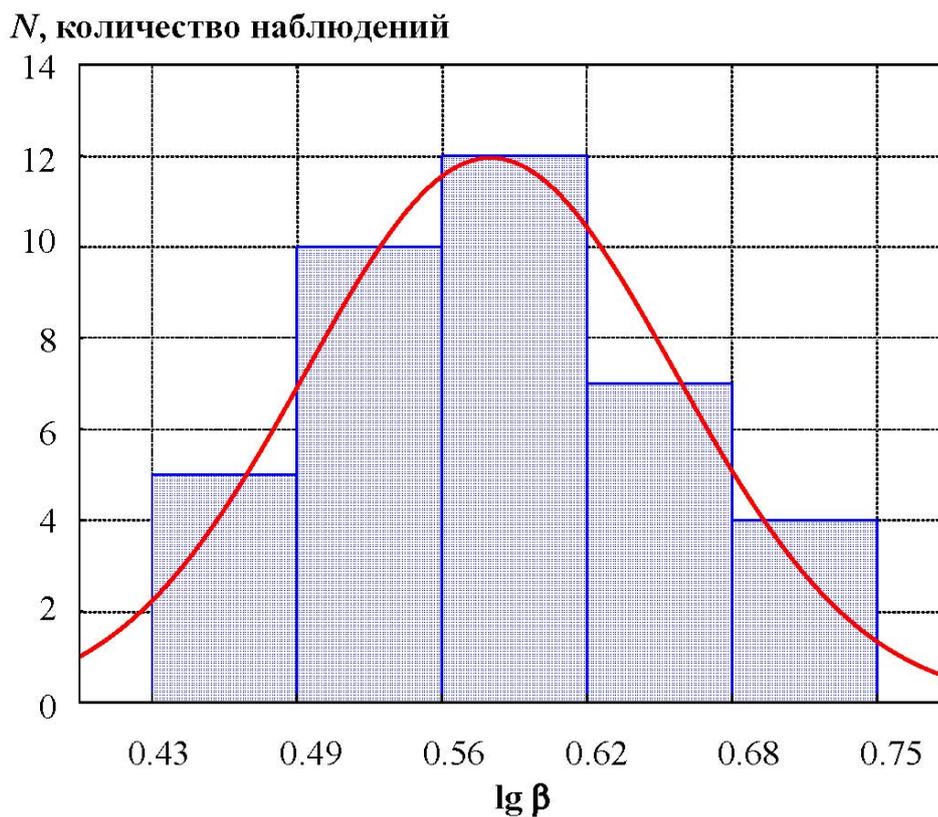
Распределение величины  $\lg \beta$  при 5% демпфировании для взбросов (38 записей) показано на рисунке 3.20 и описывается выражением (3.25):

$$\lg \beta = 0.58 \pm 0.08 \quad (\beta = 3.80). \quad (3.25)$$

Как видим, эти значения больше среднего, определенного без учета механизма очага (см. пункт 3.4.2.1).

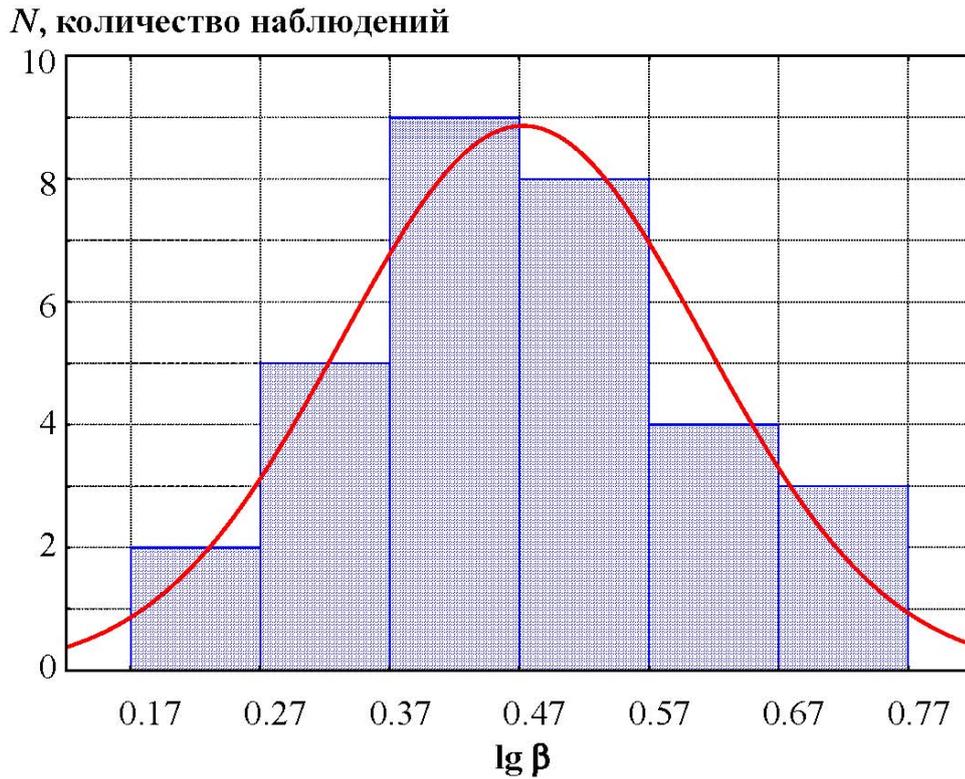
Распределение величины  $\lg \beta$  при 5% демпфировании для механизмов сдвигового типа (31 запись) показано на рисунке 3.21:

$$\lg \beta = 0.47 \pm 0.13 \quad (\beta = 3.0). \quad (3.26)$$



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.58 \pm 0.08$

Рисунок 3.20 – Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для взбросов (38 событий)

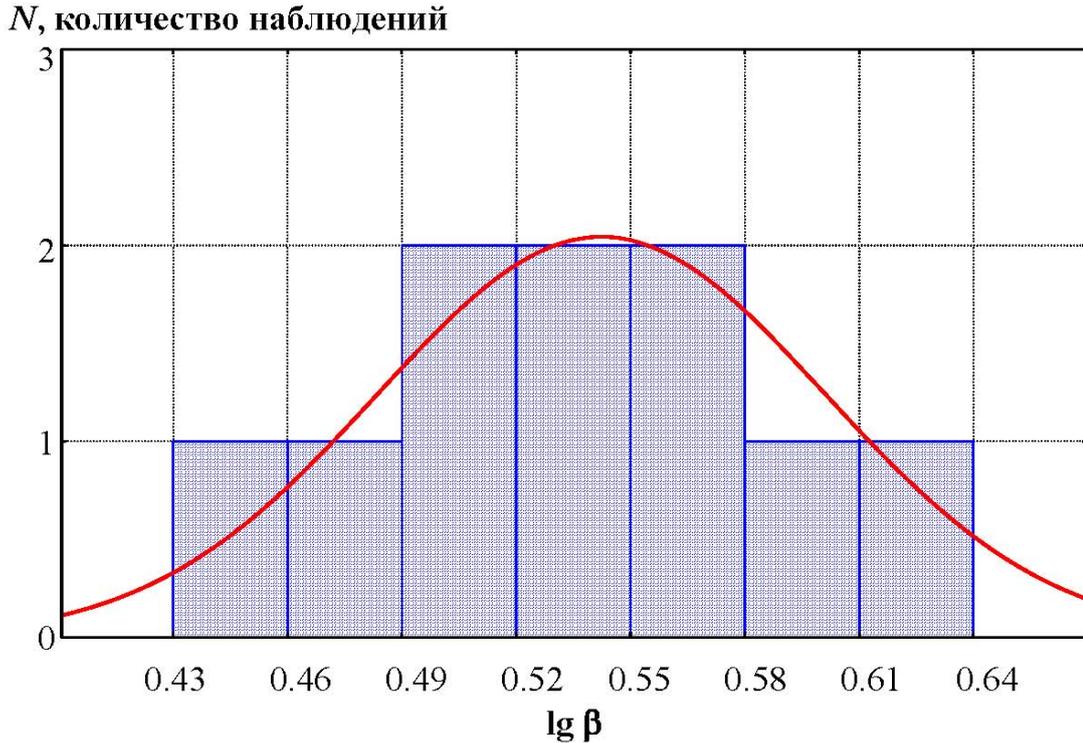


Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.47 \pm 0.13$

Рисунок 3.21 – Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для сдвигов (31 событие)

На рисунке 3.22 показано эмпирическое распределение параметра  $\beta$  для механизмов сбросового типа:

$$\lg \beta = 0.54 \pm 0.06 \quad (\beta = 3.5). \quad (3.27)$$



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.54 \pm 0.06$

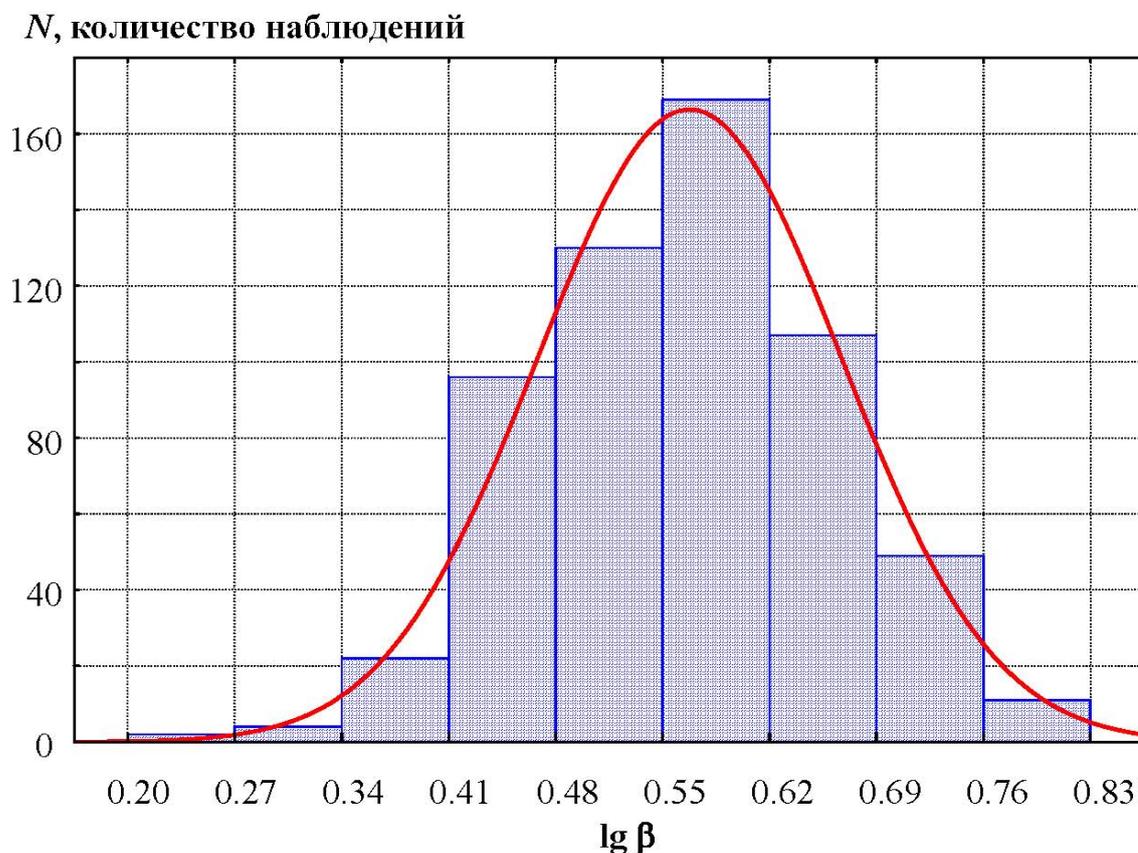
Рисунок 3.22 – Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для механизмов сбросового типа (10 событий)

Суммируя полученные результаты, можем заключить, что параметр  $\beta$  зависит от типа подвижки в очаге. Наименьшее значение он имеет для механизмов сдвигового типа, а наибольшее - для механизмов сбросового и взбросового типов.

### 3.4.2.3 Зависимость коэффициента динамического усиления от категории грунта

Рассмотрим связь коэффициента динамического усиления  $\beta$  с типом грунта в точке регистрации, группируя имеющиеся данные по грунтам I, II и III и IV категорий.

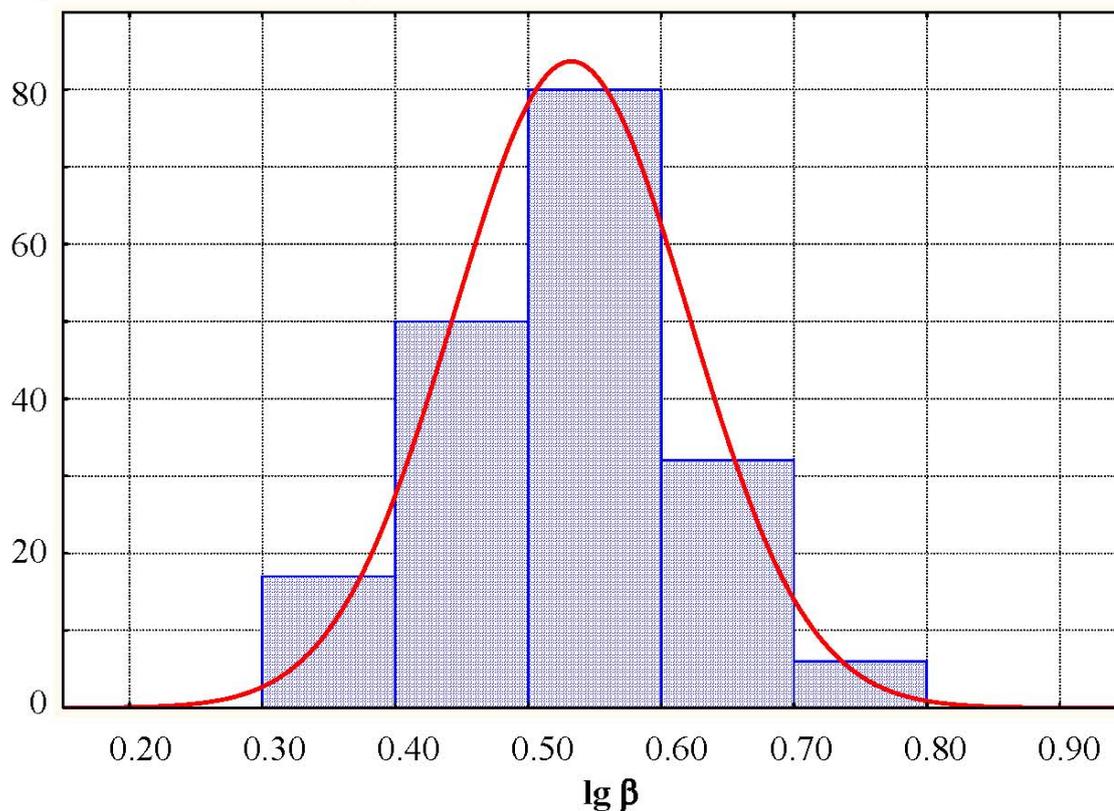
Для примера на рисунке 3.23 показано эмпирическое распределение для грунтов I категории ( $0.57 \pm 0.10$ ), а на рисунке 3.24 – для грунтов III и IV категорий ( $0.53 \pm 0.09$ ).



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.57 \pm 0.10$ .

Рисунок 3.23 – Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для грунтов I категории (590 событий)

$N$ , количество наблюдений



Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $0.53 \pm 0.09$

Рисунок 3.24 – Эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для грунтов III и IV категорий (185 событий)

Оценка для грунтов II категории занимает промежуточное значение, равное  $0.56 \pm 0.08$ .

Как видно, значение  $\beta$  варьируется в зависимости от типа грунта. На слабых 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 в отечественных нормах значения этого коэффициента принимаются одинаковыми для разных категорий грунтов ( $\beta = 2.5$ ).

### 3.4.2.4 Зависимость коэффициента динамического усиления от пиковой амплитуды ускорений

Исходный материал представлен на рисунке 3.25. Для исследования такой зависимости 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.

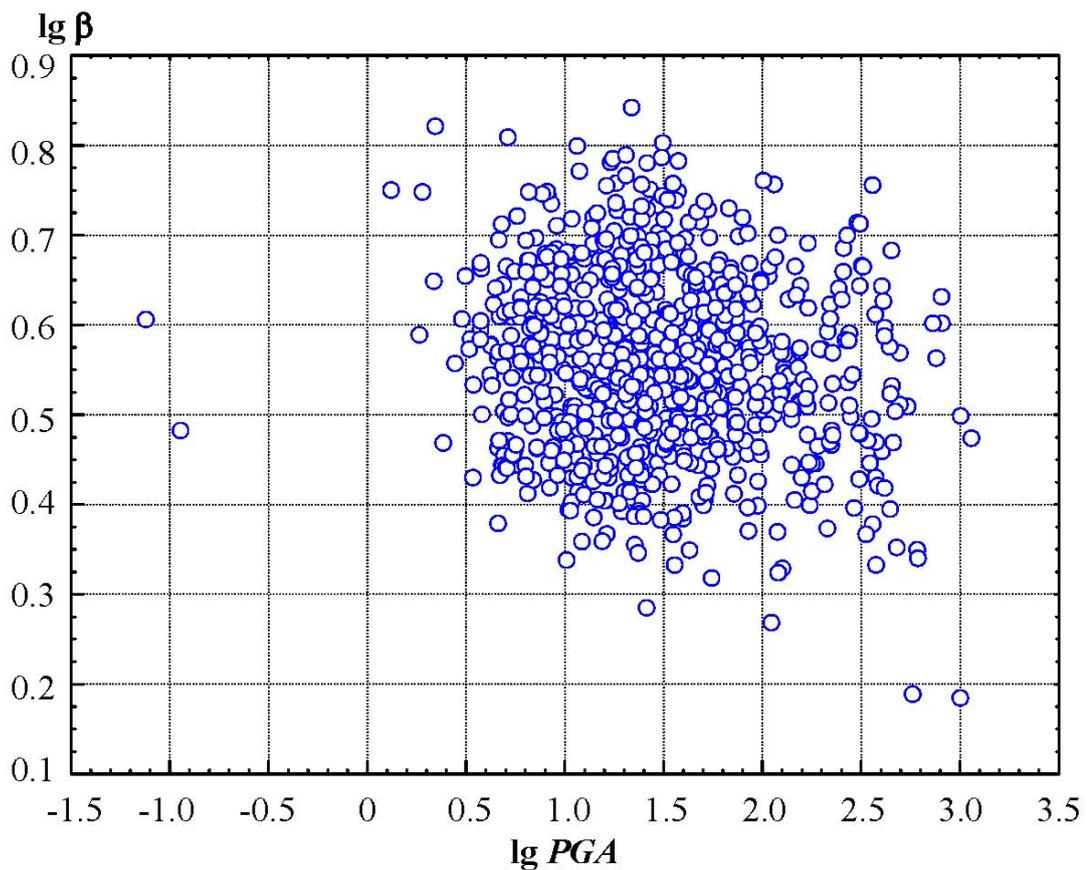


Рисунок 3.25 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и максимальным ускорением (802 события)

Такие распределения были построены для диапазона значений  $1.0 < \lg PGA < 3.0$ . Результаты сведены в таблицу 3.11.

Таблица 3.11 - Зависимость коэффициента динамического усиления  
от амплитуды ускорения

<b>lgPGA</b>	<b>1.0</b>	<b>1.2</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>1.8</b>	<b>2.0</b>	<b>2.2</b>	<b>2.4</b>	<b>2.6</b>	<b>2.8 - 3.0</b>
<b><i>N</i></b>	601	495	362	255	167	109	72	40	7	11
<b>lg β</b>	0.56	0.55	0.55	0.54	0.53	0.52	0.52	0.50	0.51	0.45
<b>β</b>	3.6	3.6	3.5	3.5	3.4	3.2	3.2	3.1	3.2	2.8
<b>σ</b>	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15	0.16
Пр и м е ч а н и е - <i>N</i> - количество данных в выборке, <i>σ</i> - стандартное отклонение										

Из таблицы 3.11 следует, что с ростом уровня колебаний коэффициент динамического усиления уменьшается от значения 3.6 до 2.8. Причем резкое изменение величины  $\beta$  происходит при значении пикового ускорения  $\approx 175 \text{ см/с}^2$ , что соответствует границе между ближней и дальней зонами.

### 3.4.2.5 Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний

Исходный материал представлен на рисунке 3.26.

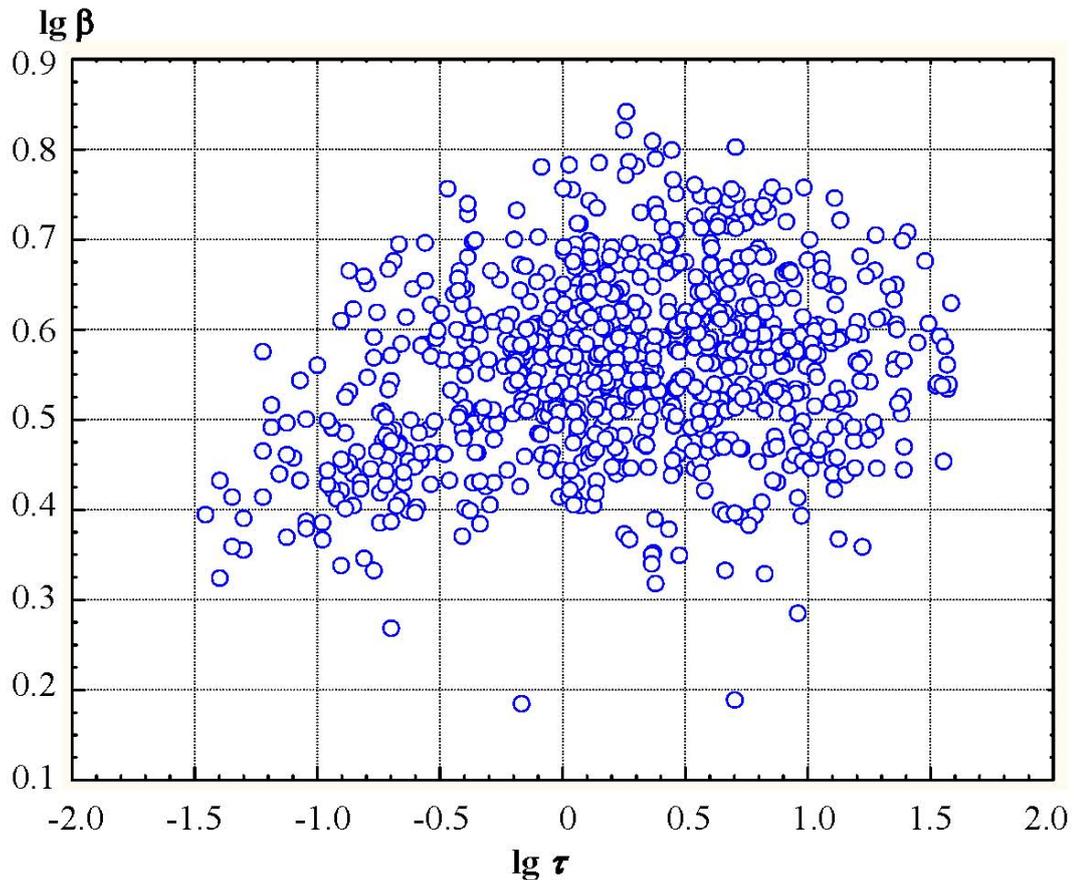
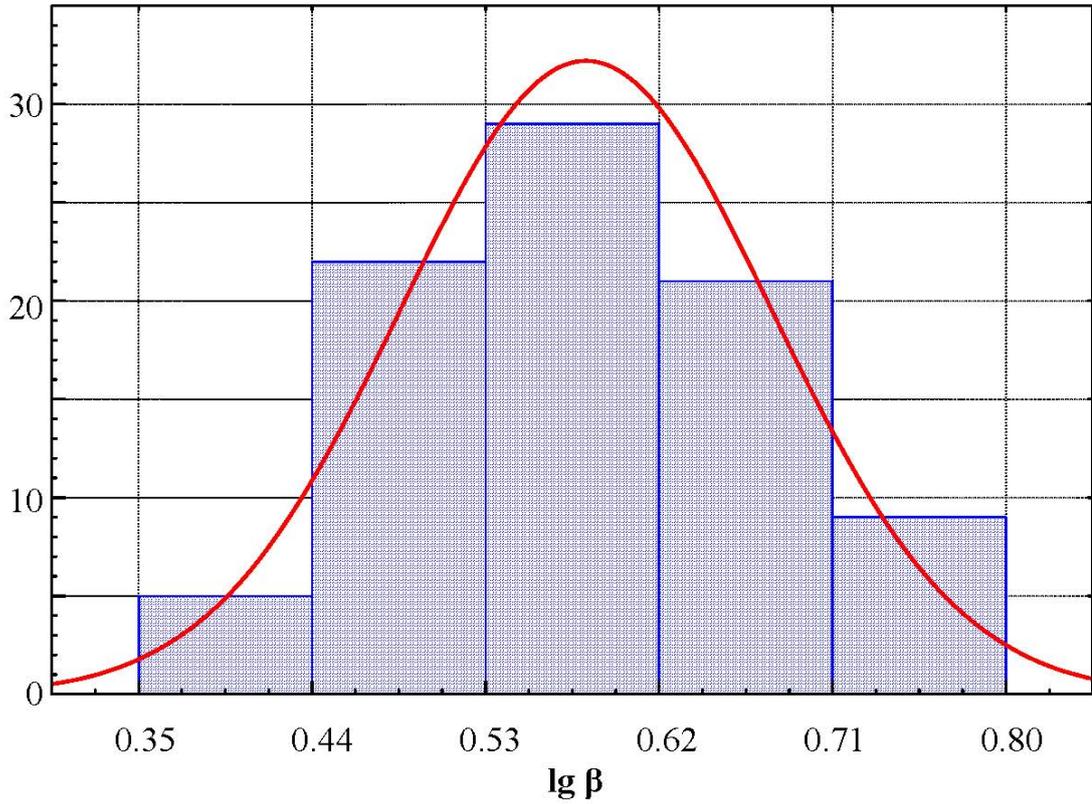


Рисунок 3.26 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и продолжительностью колебаний  $\tau$  (802 события)

Для различных интервалов  $\lg \tau$ , шириной в 0.3 ед. дес. логарифма и шагом 0.2 ед. дес. логарифма были построены распределения величины  $\lg \beta$ . Образец распределения для средней продолжительности ( $\tau \approx 5$  с,  $\lg \tau = 0.6$ ) приведен на рисунке 3.27. Для этой выборки (количество данных  $N = 100$ ) получаем  $\lg \beta = 0.59 \pm 0.11$ .

Подобные распределения были построены для диапазона значений  $-1.4 < \lg \tau < 1.6$ . Результаты сведены в таблицу 3.12.

$N$ , количество наблюдений



Красная линия - распределение Гаусса с параметрами  $0.59 \pm 0.11$

Рисунок 3.27 - Пример распределения величины  $\lg \beta$  в диапазоне  $0.5 < \lg \tau < 0.7$ . (100 событий)

Таблица 3.12 - Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний

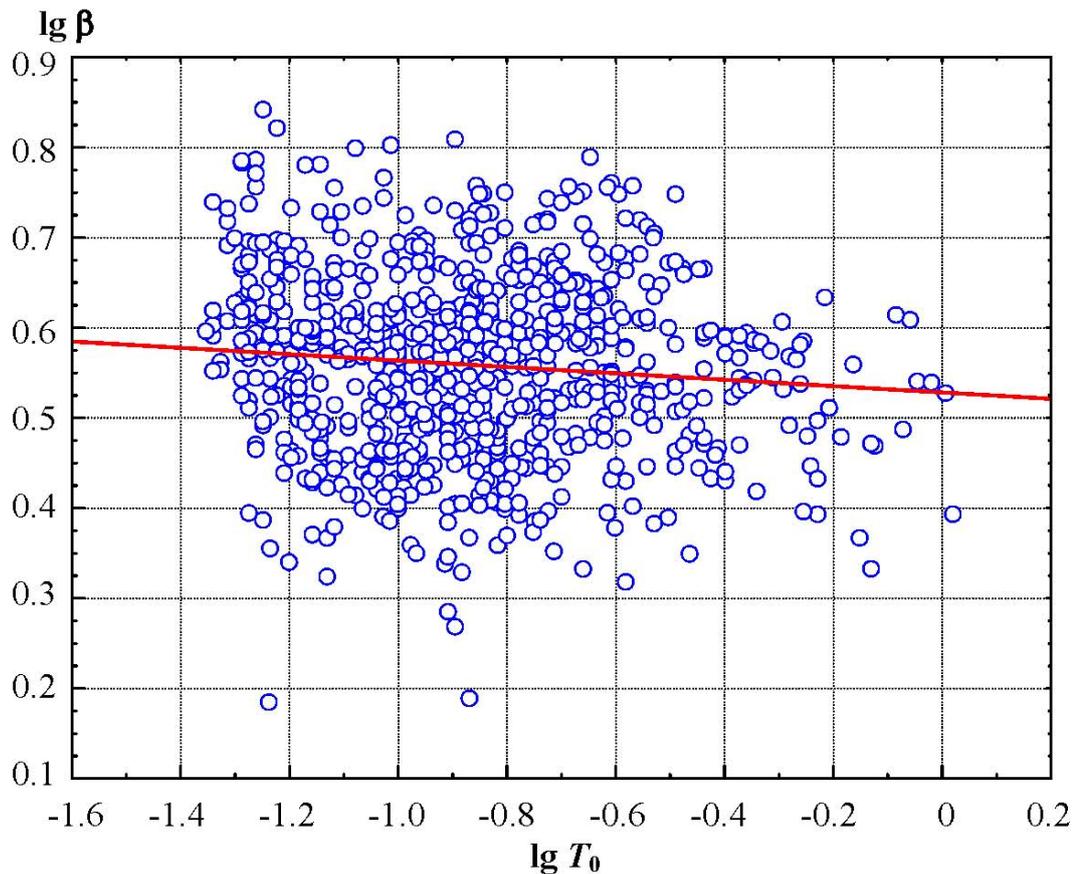
$\lg \tau$	- 1.3	- 1.1	- 0.9	- 0.7	- 0.6	- 0.5	- 0.3	- 0.1	0.1	0.3 – 1.6
$N$	10	13	29	31	35	37	35	65	105	119
$\lg \beta$	0.41	0.45	0.47	0.49	0.51	0.55	0.55	0.56	0.58	0.58
$\beta$	2.6	2.8	3.0	3.1	3.2	3.5	3.5	3.6	3.8	3.8
$\sigma$	0.05	0.05	0.09	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.10	0.11

Пр и м е ч а н и е -  $N$  - количество данных в выборке,  $\sigma$  - стандартное отклонение

Из таблицы 3.12 следует, 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.

### 3.4.2.6 Зависимость коэффициента динамического усиления от преобладающего периода

Графически эта зависимость представлена на рисунке 3.28.



Красная линия соответствует регрессии  $\lg \beta = 0.53 - 0.04 \lg T_0 \pm 0.1$

Рисунок 3.28 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и преобладающим периодом колебаний (802 события)

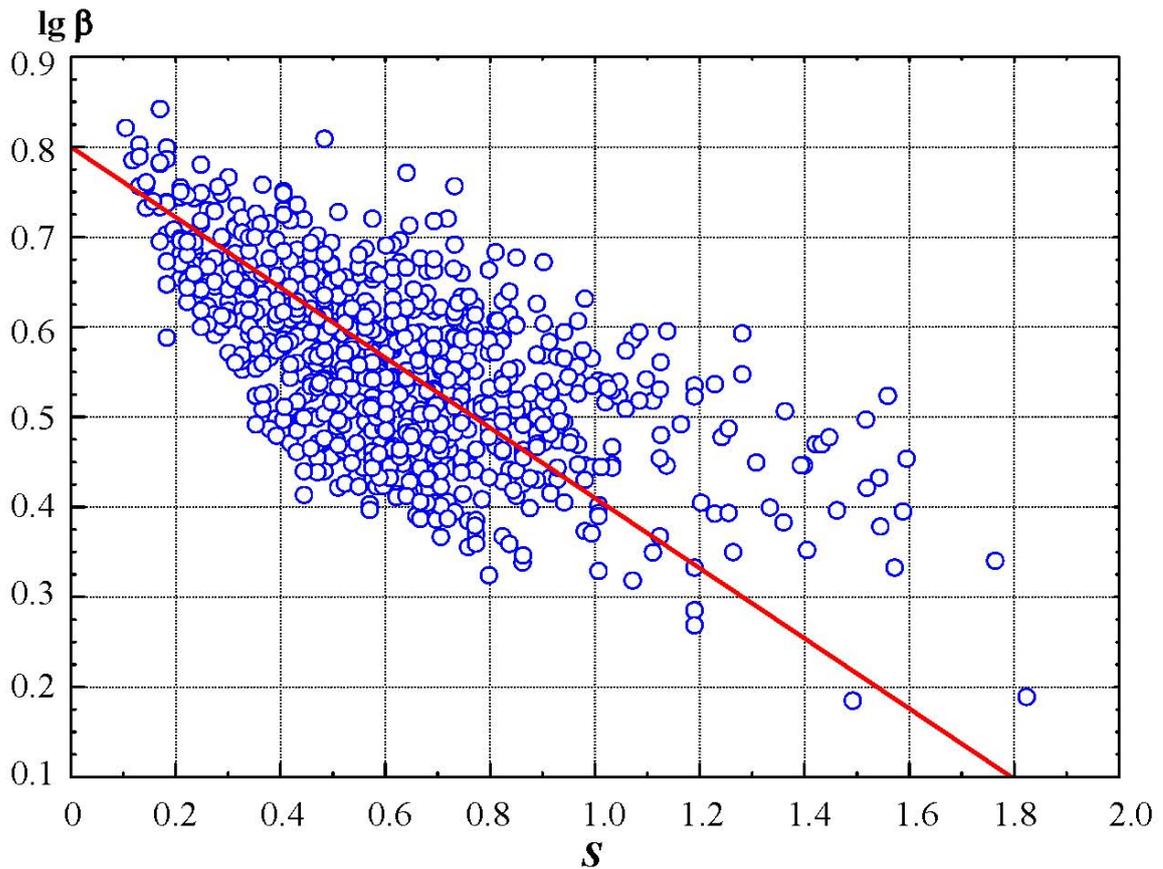
Аппроксимирующая линия описывается уравнением (3.28):

$$\lg \beta = 0.53 - 0.04 \lg T_0 \pm 0.1. \quad (3.28)$$

Анализ соотношения  $\beta$  и преобладающего периода  $T_0$  приводит к выводу, что связь этих параметров несущественна:

### 3.4.2.7 Зависимость коэффициента динамического усиления от ширины спектра

Диаграмма разброса данных исследуемой зависимости представлена на рисунке 3.29.



Красная линия соответствует ортогональной регрессии  $\lg \beta = 0.80 - 0.39 S \pm 0.08$

Рисунок 3.29 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и логарифмической шириной спектра  $S$

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

$$\lg \beta = 0.80 - 0.39 S \pm 0.08. \quad (3.29)$$

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

### 3.4.2.8 Зависимость коэффициента динамического усиления от количества циклов колебаний

Использование количества циклов удобно тем, что эта величина безразмерная и не зависит от магнитуды землетрясения. Эмпирические данные о связи коэффициента динамичности и количеством циклов приведены на рисунке 3.30.

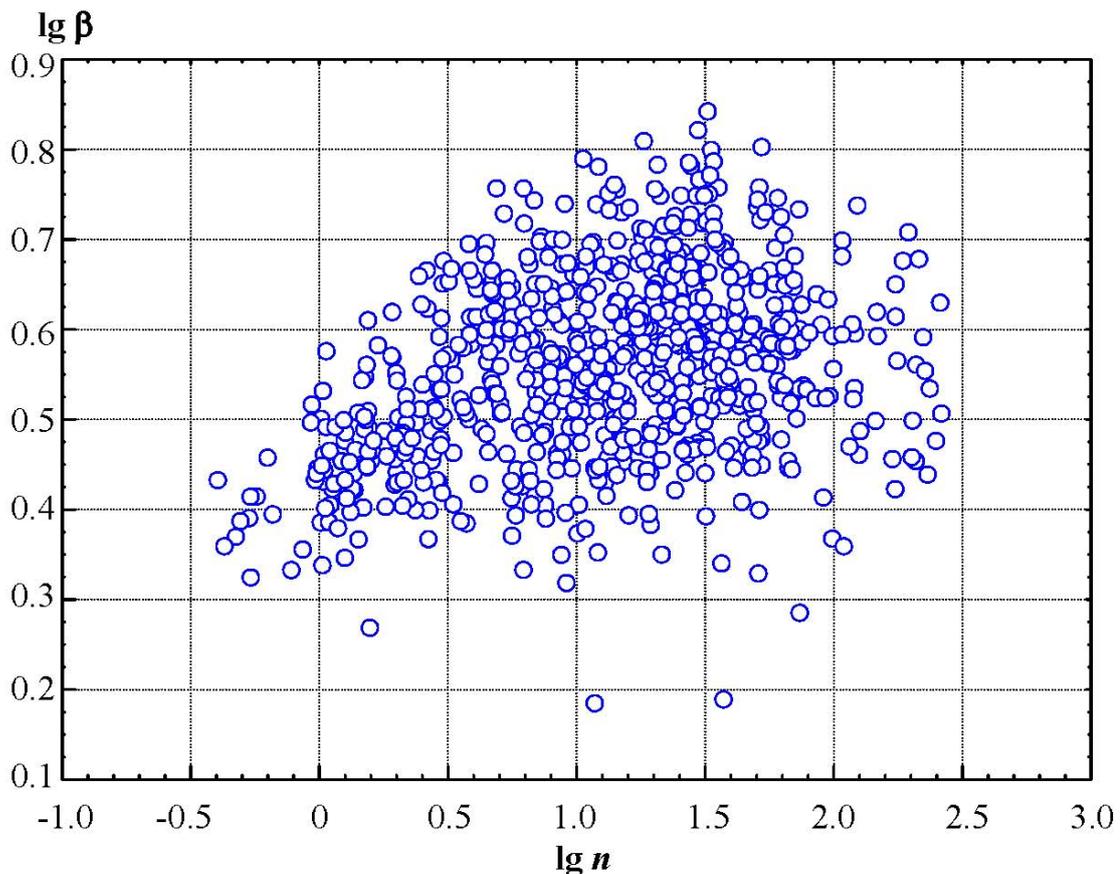


Рисунок 3.30 - Эмпирические данные о связи величины коэффициента динамичности с количеством циклов колебаний (802 события)

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  $\lg \beta$ . Результаты вычислений приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 - Связь величины коэффициента динамичности  $\beta$   
с количеством циклов  $n$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$N$	65	64	54	29	41	39	38	43	44	46
$\lg \beta$	0.43	0.49	0.54	0.56	0.57	0.56	0.57	0.57	0.57	0.56
$\beta$	2.7	3.1	3.5	3.6	3.7	3.6	3.7	3.7	3.7	3.6
$\sigma$	0.06	0.07	0.09	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.10	0.10
Пр и м е ч а н и е - $N$ - количество данных в выборке, $\sigma$ - стандартное отклонение										

Полученные результаты говорят о том, 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.

### 3.5 Выводы

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 землетрясения, и установлены корреляционные соотношения.

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

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

5. Уточнены уравнения для оценки преобладающих периодов колебаний.

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

## Глава 4 ПИКОВЫЕ СКОРОСТИ ГРУНТА

Аналогично ускорению проведем исследования особенностей пиковых скоростей колебаний грунта как во временной, так и в спектральной области. Прежде всего рассмотрим затухание пиковых скоростей ( $PGV$ ), соотношения амплитуд скорости на различных компонентах и продолжительность колебаний в скоростях. Затем перейдем к рассмотрению спектров скоростей колебаний: установим среднюю форму, исследуем зависимости преобладающего периода, коэффициента динамического усиления и ширины спектра от различных факторов.

### 4.1 Закон масштабирования кривых затухания пиковых амплитуд скоростей

Напомним один из важнейших результатов исследований, полученный ранее и использованный в главе 3. Это – существование закона масштабирования для пиковых амплитуд ускорений грунта, суть которого состоит в том, что кривые затухания амплитуд для разных магнитуд можно совместить сдвигом не по оси амплитуд, а по оси расстояний. И хотя законы затухания различны для разломной, ближней и дальней зон [Erteleva, Aptikaev, 2013], закон масштабирования одинаков для всех зон.

Но существует ли возможность такого масштабирования для пиковых амплитуд скоростей грунта? Чтобы ответить на этот вопрос сначала обратимся к теоретическим выкладкам.

Как известно, деформация  $\varepsilon$  пропорциональна пиковой скорости грунта:

$$\varepsilon \sim PGV/v, \quad (4.1)$$

где  $v$  - скорость распространения волны.

Вследствие того, что  $\varepsilon$  есть величина безразмерная, ее удобно использовать в сейсмологии для вычисления различных параметров. В сейсмологии взрыва

(например, [Аптикаев. 1969]) широко используется теория размерностей и подобия. Согласно этой теории, безразмерные величины или безразмерная комбинация величин, не зависят от энергии (или от магнитуды). Поэтому деформация  $\varepsilon$ , а, следовательно, и пиковая скорость не должны зависеть от магнитуды на подобных расстояниях.

В то же время, по определению скорости, значение  $PGV$  пропорционально выражению  $PGA \times T_0$ :

$$PGV \sim PGA \times T_0, \quad (4.2)$$

где  $T_0$  - преобладающий период ускорения.

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

$$\lg T_0 \sim 0.17 M_S, \quad (4.3)$$

а пиковые ускорения  $PGA$  масштабируются с коэффициентом  $0.33 M_S$ .

Тогда из формул (4.1) - (4.3) имеем:

$$\lg PGV \sim (0.33 + 0.17) M_S. \quad (4.4)$$

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

$$\lg PGV \sim 0.50 M_S. \quad (4.5)$$

Иными словами, из приведенных теоретических соотношений следует, что пиковые скорости масштабируются аналогично пиковым ускорениям, но с коэффициентом  $0.50$ . Проверим справедливость полученного выражения,

используя эмпирическую базу данных по скоростям сильных движений грунта (рисунок 4.1), подробно описанную в главе 2.

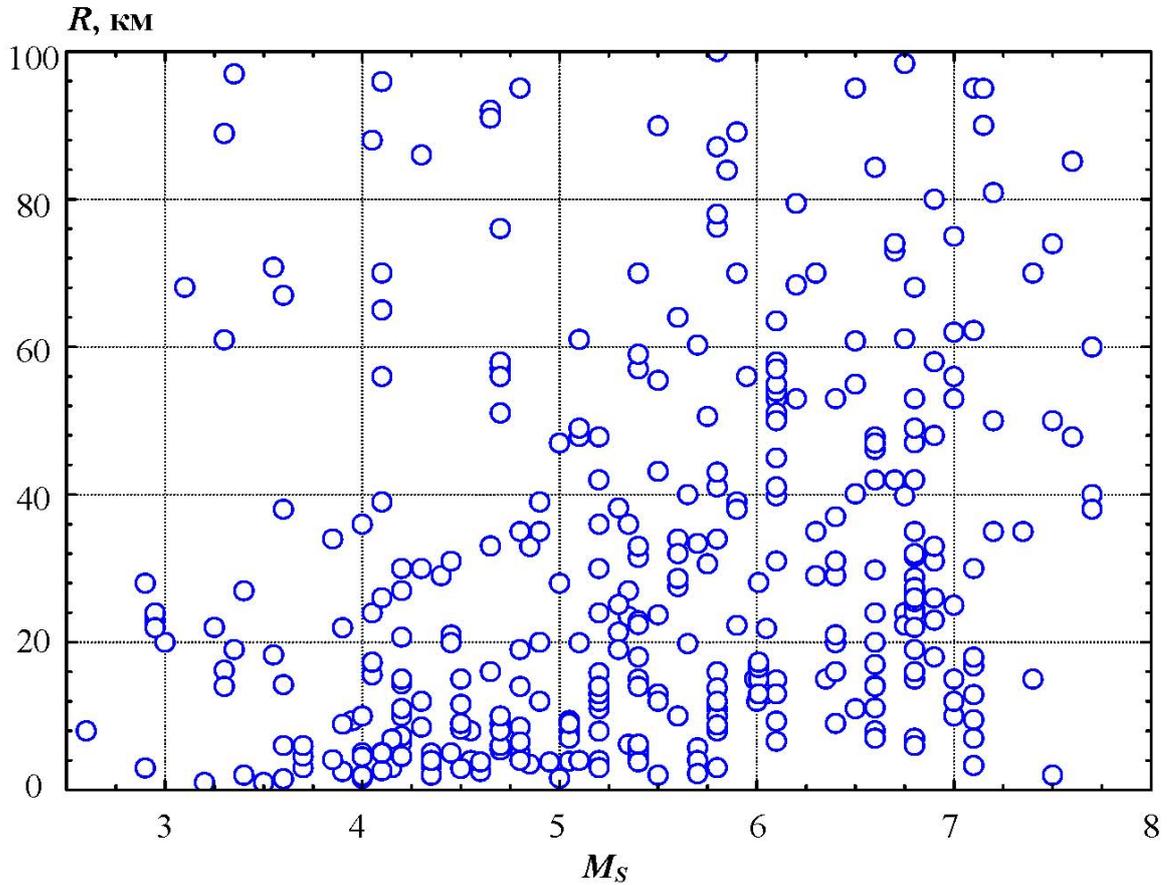


Рисунок 4.1 - Диаграмма разброса пиковых скоростей грунта (544 события)

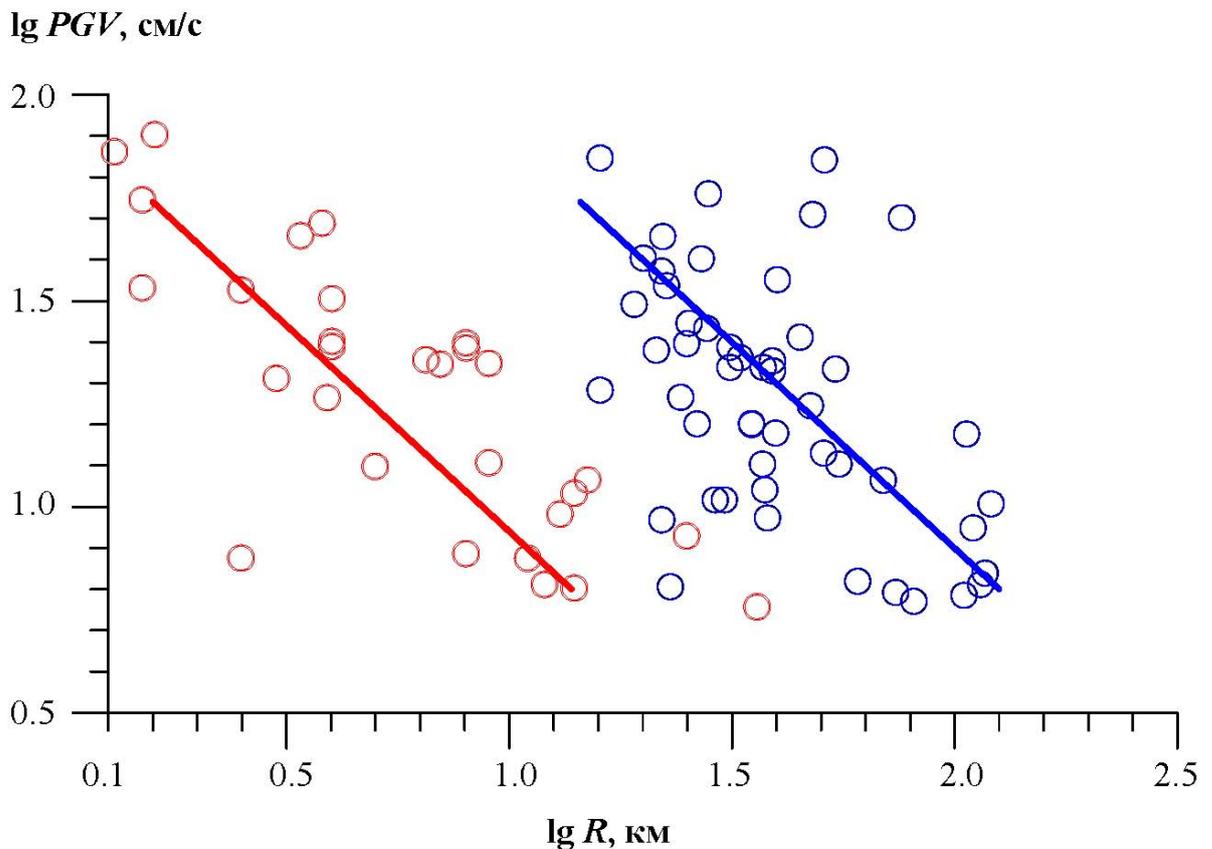
Зафиксируем значение магнитуды, чтобы рассмотреть затухание пиковой скорости в зависимости только от одной переменной – расстояния  $R$ . Т.е. из имеющейся базы данных по скоростям сильных движений грунта организуем выборку для магнитуд  $M_S = 5.0 \pm 0.5$  и рассмотрим эмпирическое распределение  $PGV$  в зависимости от расстояния  $R$ . Аппроксимирующая прямая для полученной группы точек имеет вид:

$$\lg (PGV, \text{см/с})_5 = 1.94 - 1.0 \lg R. \quad (4.6)$$

Проведя аналогичную процедуру для магнитуд  $M_S = 7.0 \pm 0.5$ , получаем следующую аппроксимирующую прямую:

$$\lg (PGV, \text{см/с})_7 = 2.90 - 1.0 \lg R. \quad (4.7)$$

Графически эти два распределения и соответствующие аппроксимирующие прямые показаны на рисунке 4.2.



Красные кружки и красная линия – эмпирические данные и аппроксимирующая линия для магнитуды  $M_S = 5.0 \pm 0.5$ , голубые кружки и голубая линия – то же самое для магнитуды  $M_S = 7.0 \pm 0.5$ .

Рисунок 4.2 - Эмпирическое распределение  $PGV$  в зависимости от расстояния  $R$  для фиксированных значений магнитуды

Из сравнения этих двух аппроксимирующих линий видно, что они имеют практически один и тот же наклон. Но тогда, очевидно, что эти линии могут быть

совмещены сдвигом вдоль оси расстояния примерно на  $0.50 \lg R$  на 1 единицу магнитуды. Таким образом, эмпирическое соотношение между  $PGV$  и магнитудой можно записать в виде:

$$\partial(\lg R) = 0.50 \partial M_S. \quad (4.8)$$

Как видим, практически оно совпадает с выражением (4.5), описанным выше и полученным теоретически. Это соотношение так же, как и в случае с  $PGA$  (но с другим коэффициентом масштабирования), позволяет обрабатывать совместно данные по всем магнитудам, используя при этом нормированные расстояния ( $R^*$ ):

$$\lg R^* = \lg R - 0.50 M_S. \quad (4.9)$$

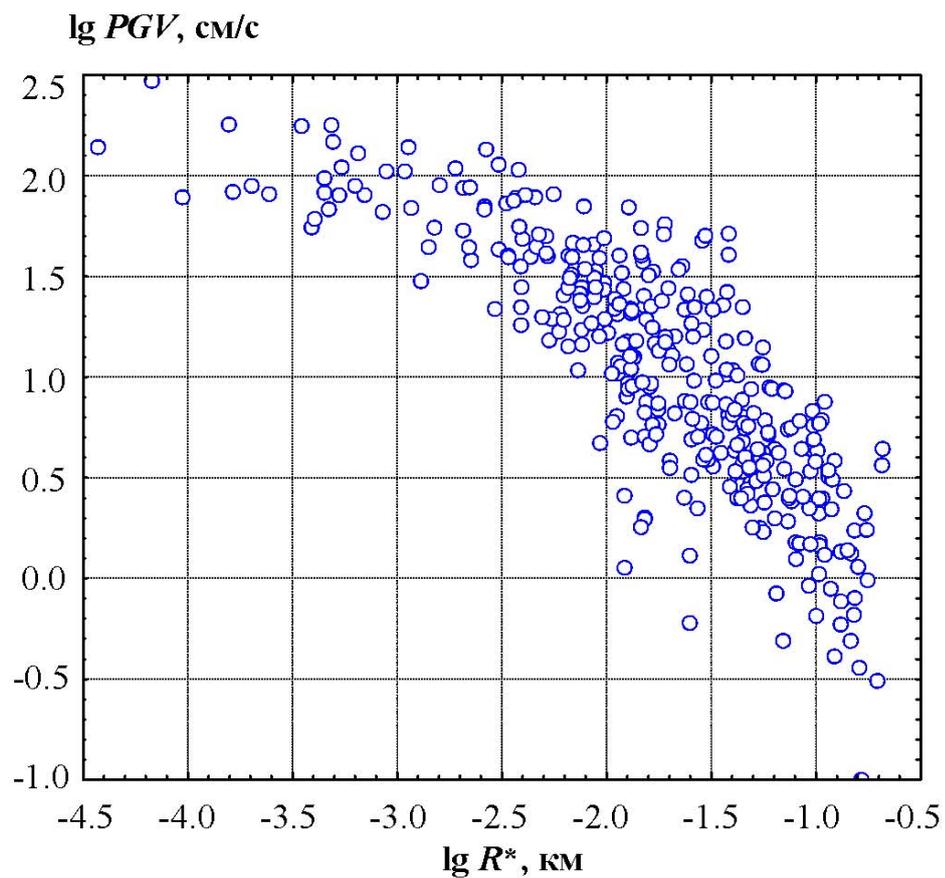
## 4.2 Закон затухания пиковых амплитуд скоростей

Как известно, затухание амплитуд сейсмических колебаний зависит, прежде всего, от расстояния и магнитуды.

Однако если использовать нормированное расстояние, определяемое формулой (4.9), то величины амплитуд скорости не будут зависеть от магнитуды события (в разломной и ближней зонах). Но тогда, как и в случае с пиковыми ускорениями, есть возможность рассмотреть все данные совместно вне зависимости от магнитуды.

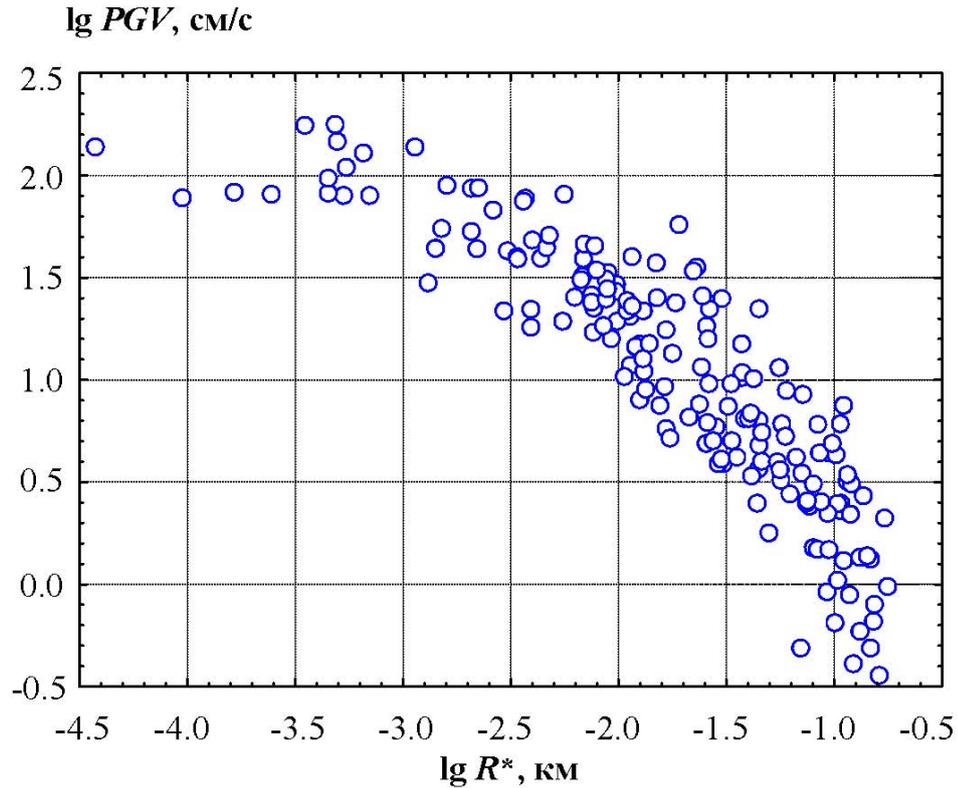
Итак, построим диаграмму разброса пиковых скоростей по нормированным расстояниям (рисунок 4.3).

Чтобы исключить влияние различных факторов, сначала выделим из имеющейся базы данных группы по типу механизма очага: сдвиг, взброс, сброс. В дальнейшем каждую из этих групп будем рассматривать отдельно. Пример такой выборки для сдвиговых землетрясений показан на рисунке 4.4.



Кружки – эмпирические данные (544 события)

Рисунок 4.3 - Диаграмма разброса пиковых скоростей  $PGV$  (по всем магнитудам, механизмам очага, типам грунта) по нормированным расстояниям  $R^*$

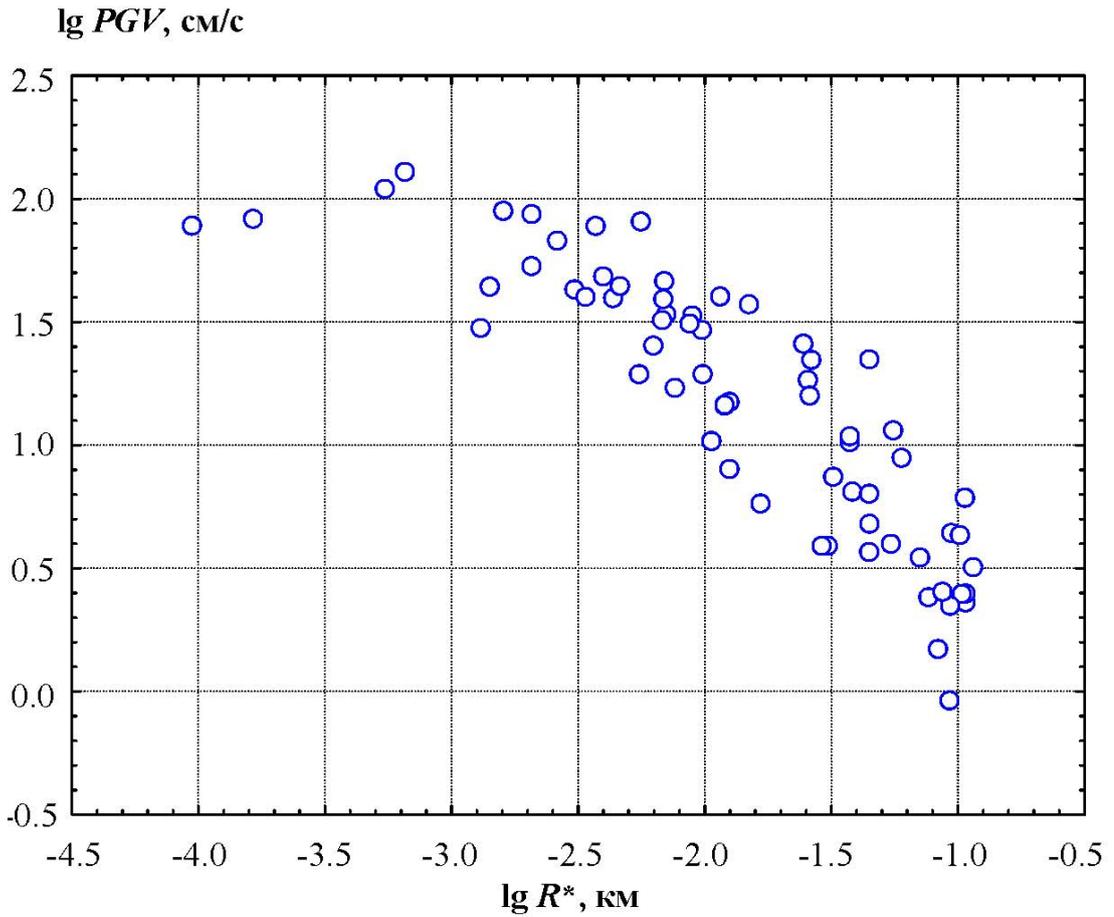


Кружки – эмпирические данные (177 событий)

Рисунок 4.4 - Диаграмма разброса пиковых скоростей  $PGV$  (все типы грунта и все магнитуды) для сдвиговых механизмов по нормированным расстояниям  $R^*$

И, наконец, разделим каждый полученный таким образом набор данных по типу грунта по сейсмическим свойствам: I, II и III - IV категории. На рисунке 4.5 в качестве примера показано распределение пиковых скоростей грунта для группы данных сдвиговых землетрясений на грунтах III и IV категории.

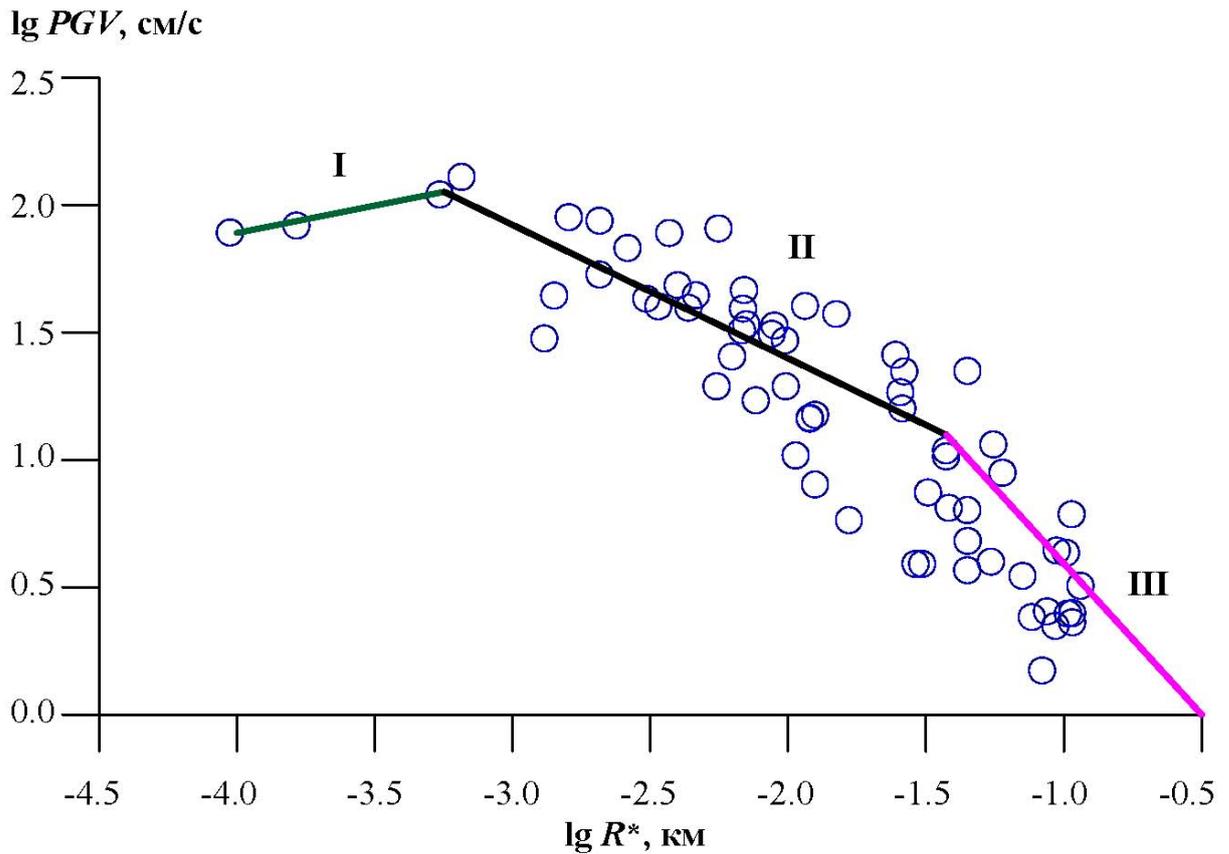
Тогда, анализируя полученные эмпирические распределения скоростей из нашей базы данных, получаем, что все поле скоростей, как и в случае пиковых ускорений, можно разделить на 3 зоны, в каждой из которых затухание амплитуд протекает по своим законам. По аналогии назовем их так же, как и в случае ускорений, разломная, ближняя и дальняя зоны.



Кружки – эмпирические данные (97 событий)

Рисунок 4.5 - Диаграмма разброса пиковых скоростей  $PGV$  сдвиговых землетрясений (всех магнитуд) для грунтов III и IV категорий по нормированным расстояниям  $R^*$

Как видно из рисунка 4.6, пиковые амплитуды скоростей с расстоянием от разлома сначала возрастают от некоего минимального значения до максимального на границе с ближней зоной ( $R_1^*$ ), а затем начинается затухание. На графике видна первая точка излома. С ростом расстояния появляется вторая точка излома ветви графика ( $R_2^*$ ), и затухание становится более резким. Точки излома указывают на положения границ зон.



I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона

Кружки – эмпирические данные

Рисунок 4.6 - Затухание пиковых амплитуд скоростей  $PGV$  для землетрясений сдвигового типа, грунты III и IV категорий

Распределение скоростей в разломной зоне для сдвиговых землетрясений можно описать уравнением:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = 2.7 + 0.2 \lg R^*. \quad (4.10).$$

Стандартное отклонение для этой зоны не вычислено вследствие малого количества данных.

В ближней зоне зависимость пиковых скоростей от расстояния выглядит следующим образом:

$$\lg (PGV, \text{ см/с}) = 0.36 - 0.52 \lg R^* \pm 0.14. \quad (4.11)$$

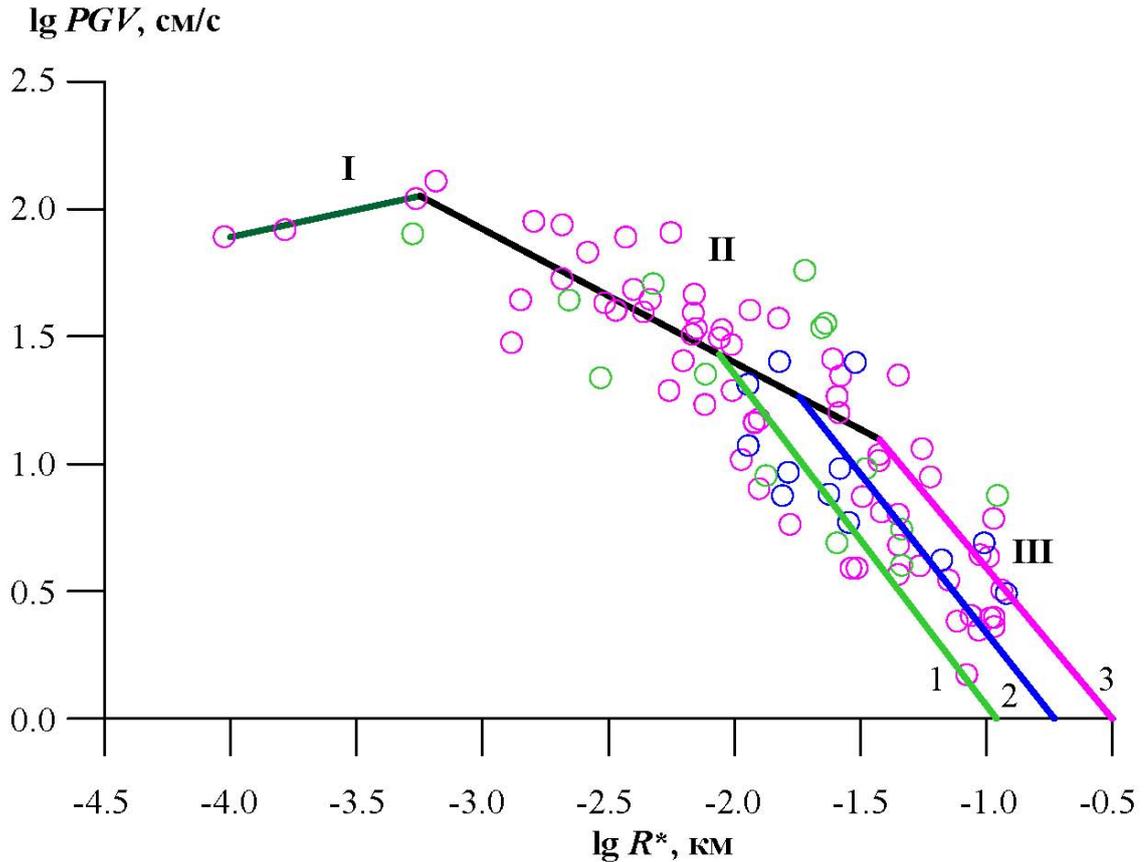
А уравнение затухания для дальней зоны имеет вид:

$$\lg (PGV, \text{ см/с}) = -0.50 - 1.12 \lg R^* \pm 0.14. \quad (4.12)$$

Стандартное отклонение от полученных зависимостей относительно мало и составляет  $\sigma = 0.14$  ед. десятичного логарифма. Как видим, стандартное отклонение для амплитуд скоростей меньше, чем для ускорений.

Рассмотрим затухание  $PGV$  для тех же сдвиговых землетрясений, но для других категорий грунтов по сейсмическим свойствам. Графически такие зависимости представлены на рисунке 4.7.

Как видно из рисунка 4.7, в первых двух зонах распределения пиковых скоростей не зависит от грунтовых условий. В дальней же зоне при неизменном наклоне графика уровень колебаний зависит от грунтовых условий, влияние которых характеризуется свободными членами уравнений затухания. По эмпирическим данным эти различия по отношению к средним грунтам составляют примерно 80%. Как следует из рисунка 4.7, 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.



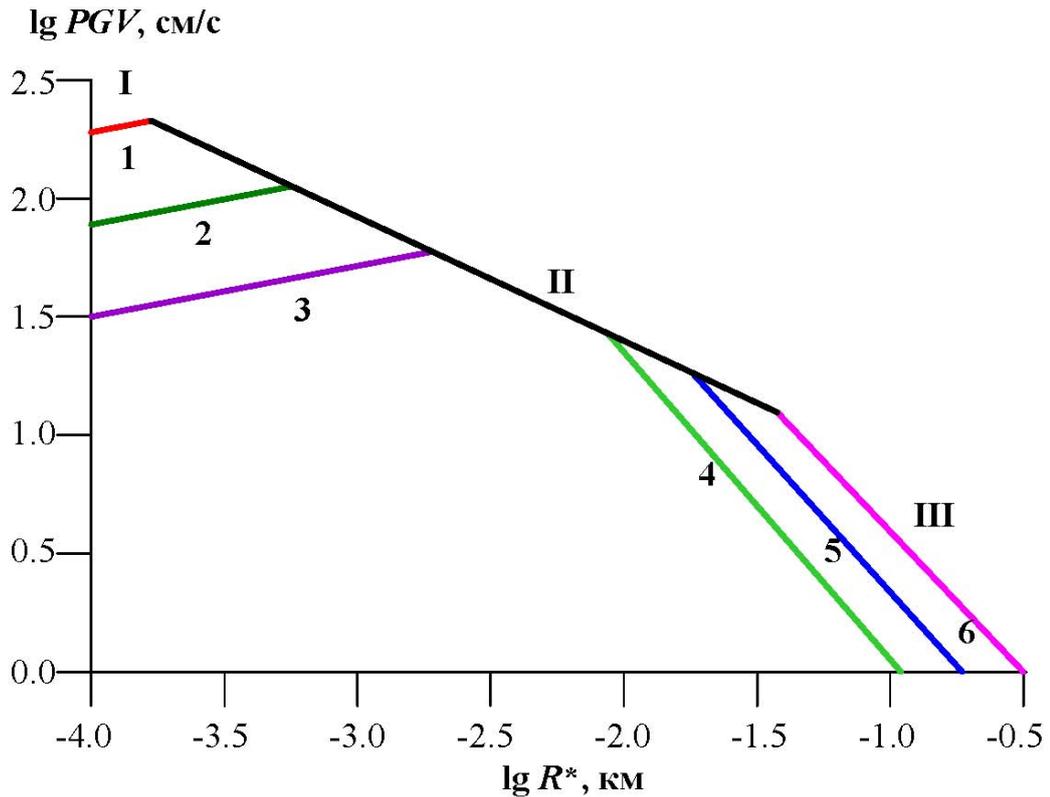
I – разломная зона, II – ближняя зона, III – дальняя зона; 1 – грунты I категории,  
2 – грунты II категории, 3 – грунты III и IV категорий

Кружки – эмпирические данные

Рисунок 4.7 - Закон затухания пиковых скоростей грунта  $PGV$  для сдвигов

Такую же процедуру проведем с ансамблями данных по другим механизмам очагов. Получаемые результаты графически представлены на рисунке 4.8.

Как видно из рисунка 4.8, в разломной зоне уровень пиковой скорости определяется механизмом очага и возрастает от минимального значения, зависящего от типа механизма, до максимального значения на границе этой зоны. При этом уровень колебаний не зависит от типа грунта.



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 ( $\lg R^* = \lg R - 0.50 M_S$ )

Рисунок 4.8 - Закон затухания пиковых скоростей

В этой зоне распределение скоростей подчиняется закону:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = C_V + 0.20 \lg R^*, \quad (4.13)$$

где  $C_V$  - постоянная, зависящая только от типа механизма очага и равная  $C_V = 3.10$  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.

Здесь процессы излучения энергии преобладают над процессами поглощения: каждый элемент среды продолжает излучать энергию, накопленную

перед землетрясением. В результате происходит как бы “подпитка” распространяющегося волнового фронта, и амплитуда колебаний возрастает.

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

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = 0.36 - 0.52 \lg R^* \pm 0.14. \quad (4.14)$$

При этом не обнаруживается значимой зависимости затухания  $PGV$  от механизма очага и грунтовых условий (см. рис. 4.7 – 4.8 и уравнение (4.11)).

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 (4.13) и (4.14):

$$\lg R_1^* = (0.36 - C_V) / 0.72. \quad (4.15)$$

где постоянная  $C_V$  определяется механизмом очага.

Значения постоянной  $C_V$  в выражениях (4.13) и (4.15), минимальные и максимальные значения  $PGV$  в приразломной зоне приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Закон изменения  $PGV$  с расстоянием 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:

$$\lg (PGV, \text{см/с}) = C_2 - 1.12 \lg R^* \pm 0.14, \quad (4.16)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта:  $C_2 = -0.74$  для грунтов II категории по сейсмическим свойствам,  $C_2 = -0.98$  для грунтов I категории и  $C_2 = -0.50$  для грунтов III и IV категорий.

В дальней зоне преобладают процессы поглощения энергии, поэтому затухание колебаний очень сильно. Влияния типа механизма очага на затухание уровня амплитуд скоростей  $PGV$  не наблюдается. Уровень кривых затухания здесь определяется грунтовыми условиями в точке наблюдения.

Положение второго излома кривых затухания  $R_2^*$  между ближней и дальней зоной, как и выше, может быть определено как точка пересечения прямых, описываемых уравнениями (4.14) и (4.16):

$$\lg R_2^* = (C_2 - 0.36) / 0.60. \quad (4.17)$$

где  $C_2$  – постоянная, зависящая от типа грунта (см. уравнение.(4.16)).

### **4.3 Соотношение пиковых амплитуд скоростей на различных компонентах**

Вопрос соотношения амплитуд на различных компонентах очень важен, прежде всего, с практической точки зрения. Ведь если, как и в случае ускорений, существует определенное соотношение между уровнями скоростей на различных компонентах, то существует и возможность при исследованиях ограничиться изучением только максимальной компоненты.

#### **4.3.1 Соотношение пиковых амплитуд скоростей на горизонтальных компонентах**

Рассмотрим отношение амплитуд скоростей на горизонтальных компонентах. Такая зависимость по набору всех имеющихся данных выражается соотношением:

$$\lg(PGV_{H_{\max}}/PGV_{H_2}) = -0.0017M_S + 0.0043 \lg R + 0.1611 \pm 0.11, \quad (4.18)$$

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.

Как видно из рисунка 4.9, разница логарифмов ранжированных амплитуд (соотношение максимальной и второй горизонтальной) имеет среднее значение, равное 0.16 при стандартном отклонении 0.11 ед. десятичного логарифма.

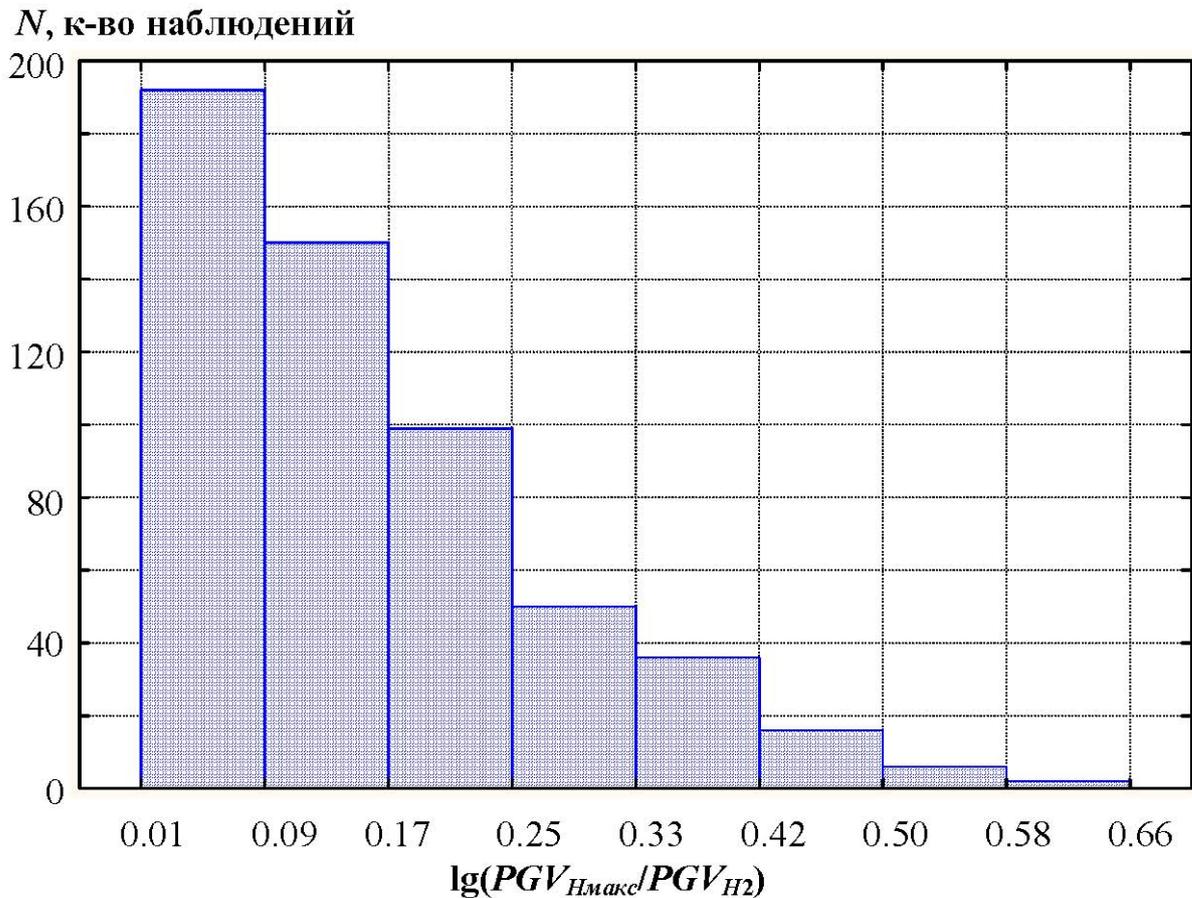
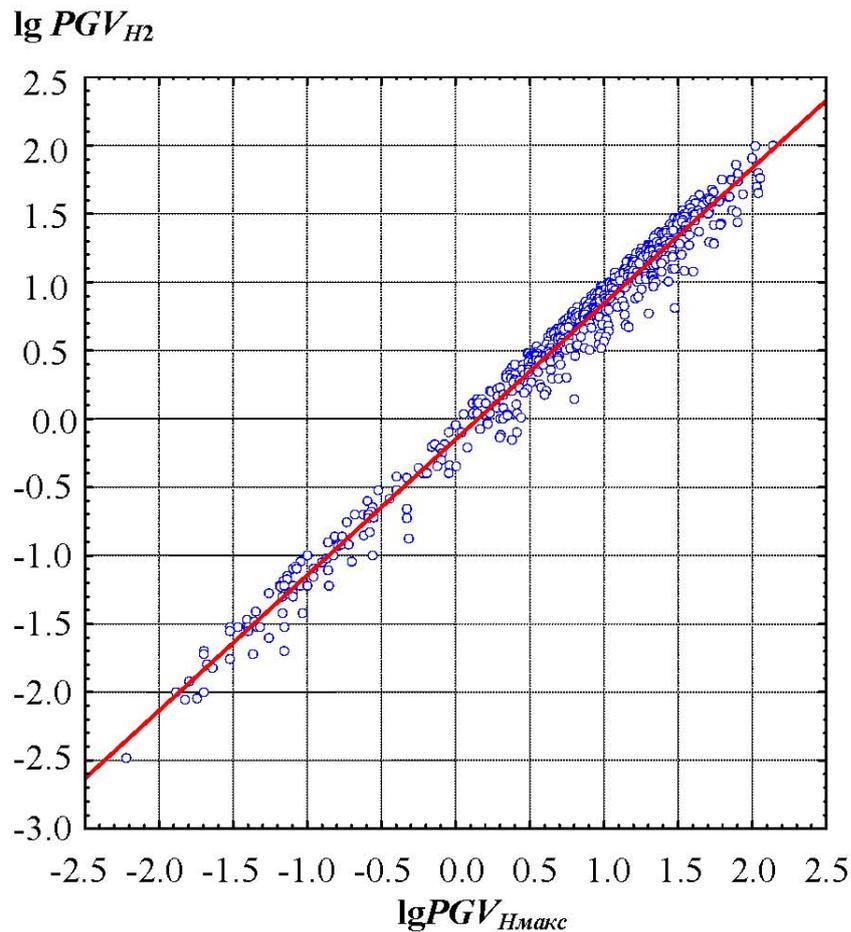


Рисунок 4.9 - Распределение отношения максимальных амплитуд скоростей на горизонтальных компонентах  $\lg(PGV_{H_{\max}}/PGV_{H_2})$  (551 событие)

Отсюда следует, что максимальная горизонтальная компонента в среднем на 43% превышает вторую горизонтальную компоненту или, что то же самое, максимальная по уровню компонента превышает вторую горизонтальную примерно в 1.43 раза. При этом, зная значение более интенсивной компоненты, значение уровня второй горизонтальной компоненты можно определить по формуле (рисунок 4.10):

$$\lg PGV_{H2} = \lg PGV_{H\max} - 0.15 \pm 0.11. \quad (4.19)$$

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

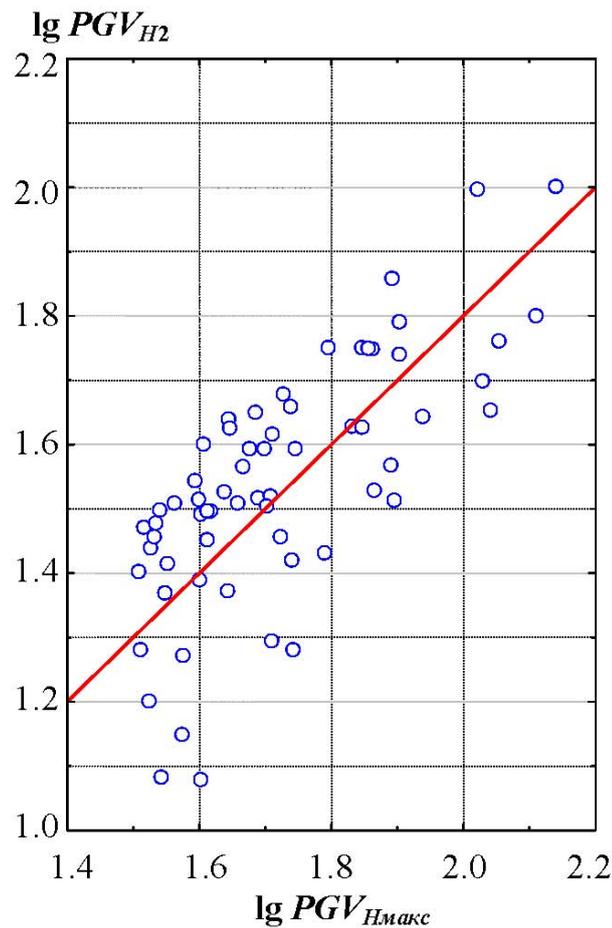


Кружки - эмпирические данные (551 событие); красная линия –  
аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.10 - Зависимость  $PGV_{H2}$  от  $PGV_{H\max}$

Как было показано ранее (см. раздел 4.2), характер затухания скоростей определяется местоположением рассматриваемой точки, т.е. зависит от того, в какую зону она попадает. Принимая во внимание тот факт, что наибольшее количество данных относится к ближней и дальней зонам, целесообразно рассмотреть исследуемую взаимосвязь амплитуд на горизонтальных компонентах отдельно в каждой из этих зон. Используя для определения местоположения границы между двумя зонами результаты, полученные ранее (см. раздел 4.2), получаем следующие соотношения:

$$\lg PGV_{H2} = \lg PGV_{H\max} - 0.20 \pm 0.11 \text{ для ближней зоны (рисунок 4.11) (4.20)}$$

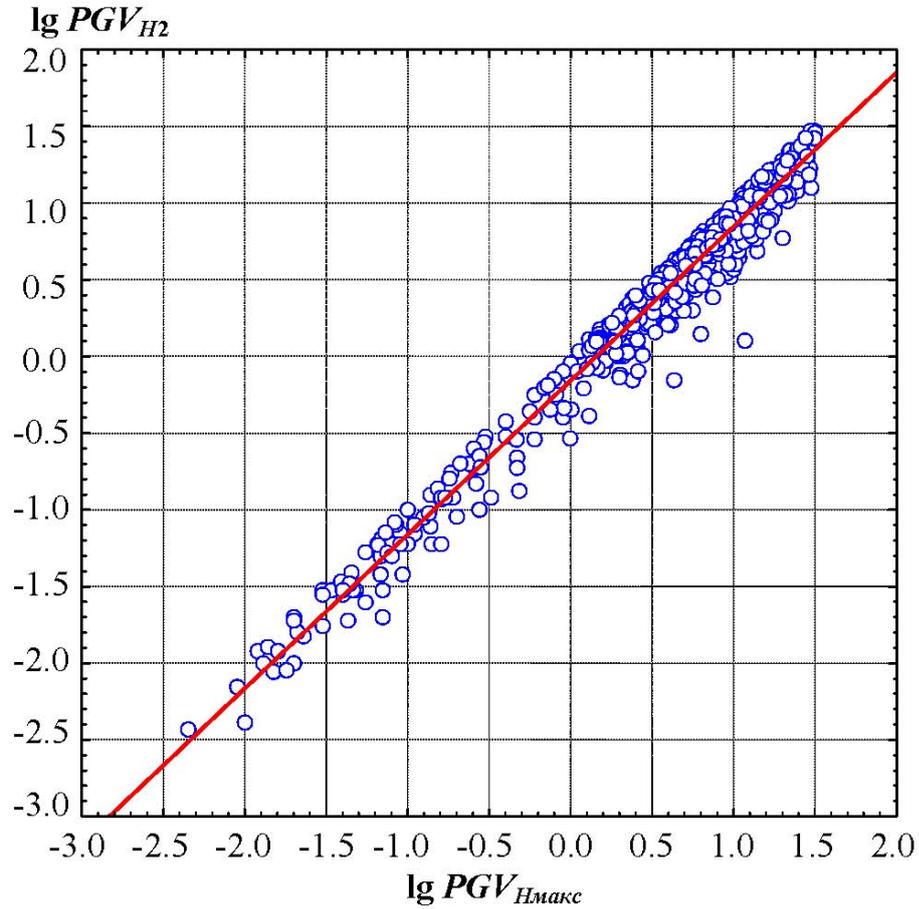


Кружки - эмпирические данные (71 событие),  
красная линия – аппроксимирующая прямая.

Рисунок 4.11 - Зависимость  $PGV_{H2}$  от  $PGV_{H\max}$  в ближней зоне

и

$$\lg PGV_{H2} = \lg PGV_{H\max} - 0.15 \pm 0.11 \text{ для дальней зоны (рисунок 4.12)}. \quad (4.21)$$



Кружки - эмпирические данные (480 событий),  
красная линия – аппроксимирующая прямая.

Рисунок 4.12 - Зависимость  $PGV_{H2}$  от  $PGV_{H\max}$  в дальней зоне

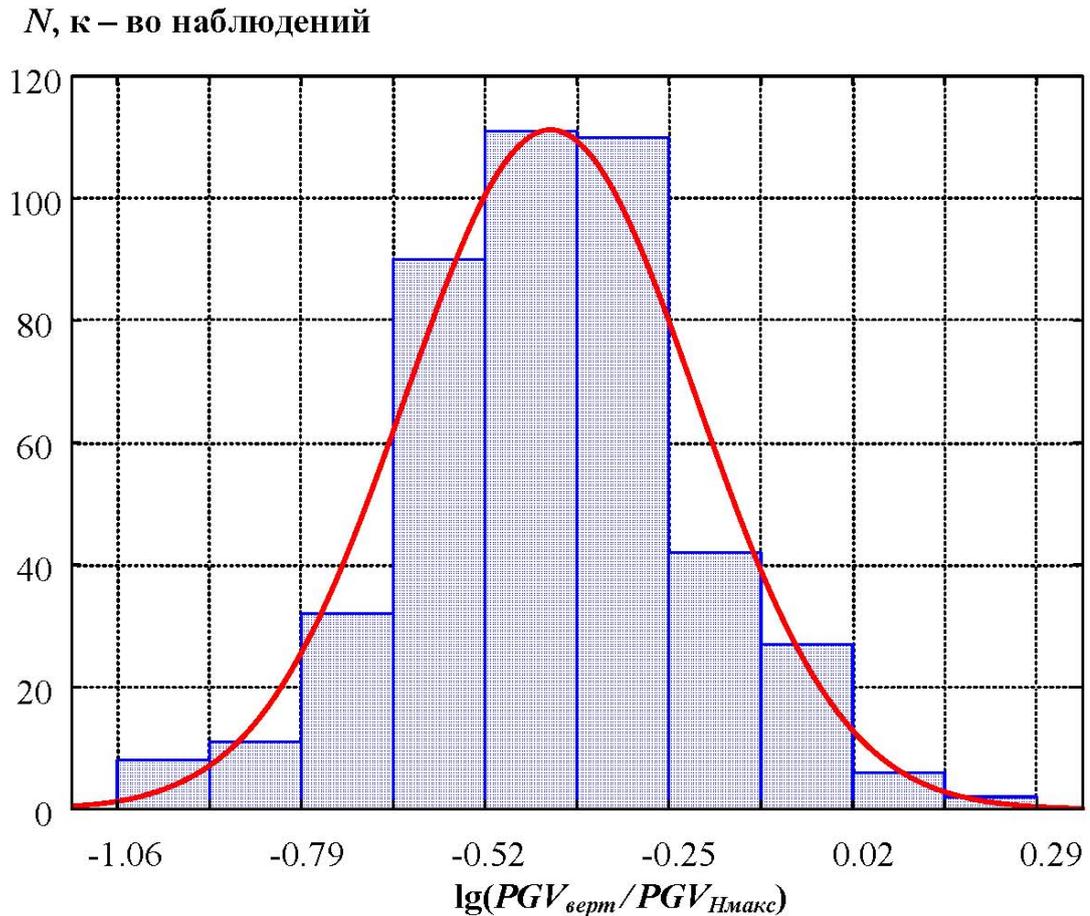
Как видно, соотношения в ближней и дальней зоне различаются лишь на 0.05 ед. десятичного логарифма.

Таким образом, можно заключить, что отношение  $PGV_{H2}$  и  $PGV_{H\max}$  практически не зависит ни от магнитуды события, ни от расстояния.

### 4.3.2 Уровень вертикальной компоненты

Как показывает практика, вертикальная компонента имеет ряд особенностей в сравнении с горизонтальными компонентами, в том числе, и по частотному составу, и по уровню колебаний. Подчас эти отличия ее представляются настолько значительными, что под сомнение ставится и наличие взаимозависимостей между различными параметрами вертикальной и горизонтальных составляющих движения. Однако, как было показано выше (см. главу 3), в случае ускорений прогноз параметров вертикальной компоненты движения возможен с использованием данных по максимальной горизонтальной компоненте. Попытаемся оценить подобные соотношения и для скоростей движения.

Итак, рассмотрим соотношение амплитуды колебаний вертикальной компоненты  $PGV_{верт}$  и максимальной горизонтальной (или, что то же самое, главной) компоненты  $PGV_{Hmax}$ . Отношение пиковых амплитуд этих компонент представлено на рисунке 4.13. Среднее значение этого отношения для выборки 439 событий составляет -0.43 ед. десятичного логарифма, стандартное отклонение  $\sigma = 0.21$ . Значение пиковой амплитуды вертикальной компоненты примерно на 60% меньше пикового значения более интенсивной горизонтальной компоненты.



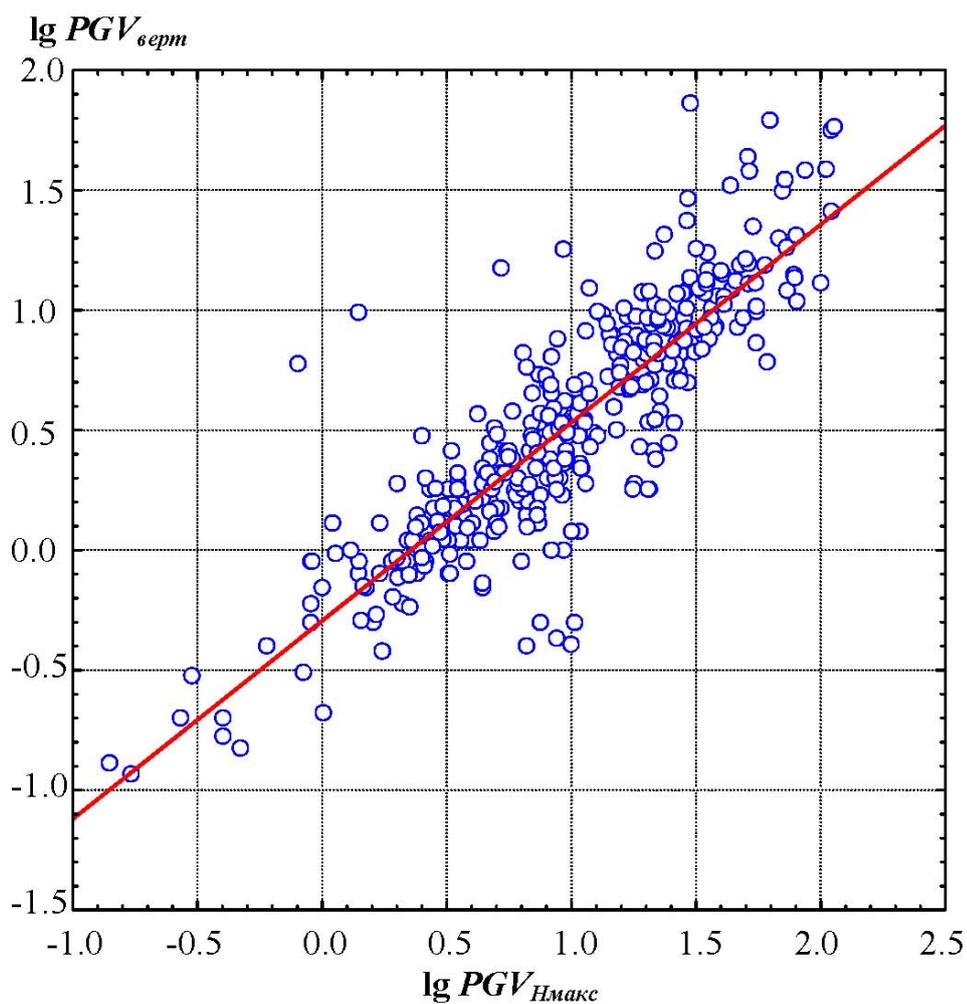
Красная линия – распределение Гаусса с параметрами  $-0.43 \pm 0.21$

Рисунок 4.13 - Отношение пиковых амплитуд вертикальной и максимальной горизонтальной компонент (439 событий)

Зависимость амплитуды колебаний вертикальной компоненты от максимальной горизонтальной графически представлена на рисунке 4.14 и описывается уравнением:

$$\lg PGV_{\text{верт}} = 0.82 \lg PGV_{\text{Нмакс}} - 0.29 \pm 0.29. \quad (4.22)$$

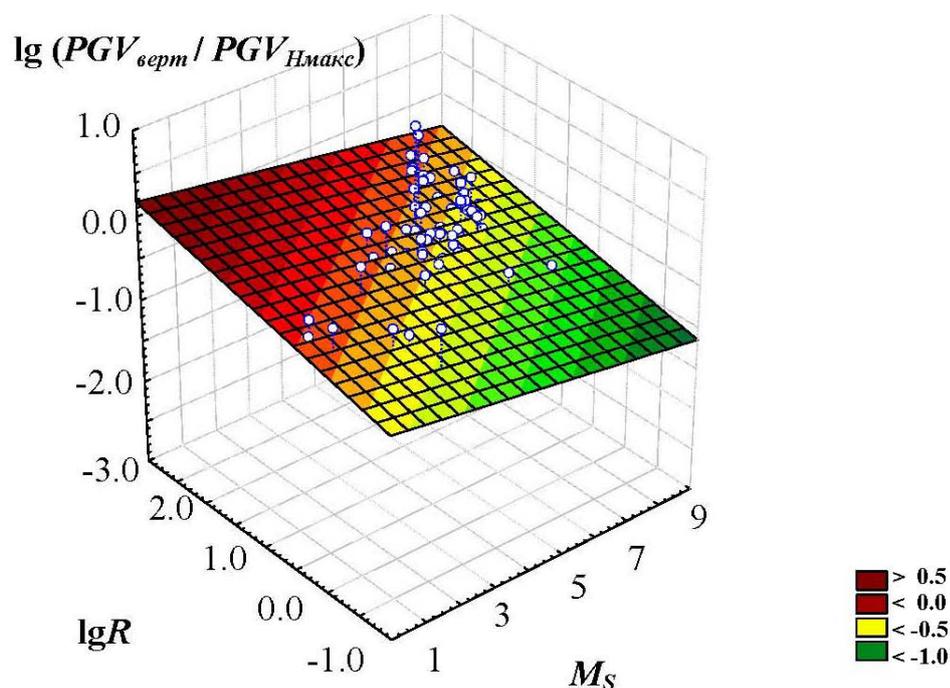
Коэффициент корреляции при этом составляет  $r = 0.87$ .



Кружки - эмпирические данные (439 событий), красная линия –  
 аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.14 - Зависимость  $PGV_{верт}$  от  $PGV_{Нмакс}$

С расстоянием разница в уровнях между вертикальной и максимальной горизонтальной компонентами возрастает, т.е. вертикальная растет быстрее, а с ростом магнитуды, наоборот, уменьшается (рисунок 4.15).



Кружки - эмпирические данные (159 событий)

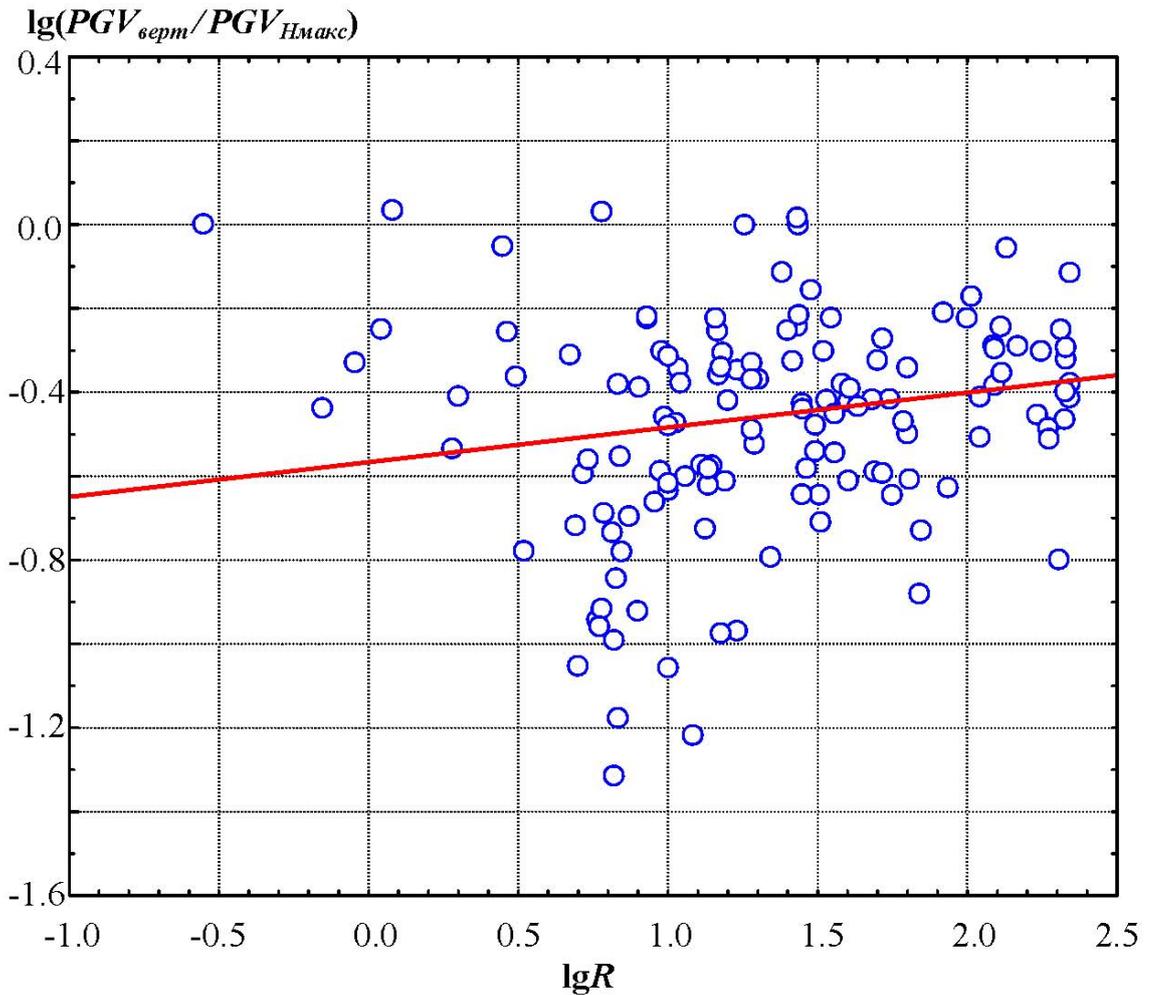
Рисунок 4.15 - Зависимость отношения  $\lg(PGV_{\text{верт}}/PGV_{\text{Нмакс}})$  от магнитуды  $M_S$  и расстояния  $R$

Соответствующая формула для выборки 159 событий имеет вид:

$$\lg(PGV_{\text{верт}}/PGV_{\text{Нмакс}}) = 0.19 \lg R - 0.06 M_S - 0.38 \pm 0.33. \quad (4.23)$$

Однако, как видно из формулы (4.23), отношение уровня вертикальной и максимальной горизонтальной компоненты от магнитуды незначительна, что и неудивительно, поскольку безразмерная величина не должна зависеть от масштаба явления. Зависимость от расстояния требует дополнительного изучения.

Рассмотрим зависимость отношения амплитуд вертикальной и максимальной горизонтальной компоненты от расстояния отдельно для ближней и дальней зоны. Связь отношения амплитуд в дальней зоне с расстоянием показана на рисунке 4.16.



Кружки - эмпирические данные (144 события),  
красная линия – аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.16 – Зависимость величины  $\lg (PGV_{\text{верт}} / PGV_{\text{Нмакс}})$  от расстояния в дальней зоне

Уравнение аппроксимирующей линии имеет вид:

$$\lg (PGV_{\text{верт}} / PGV_{\text{Нмакс}}) = 0.08 \lg R - 0.57 \pm 0.28. \quad (4.24)$$

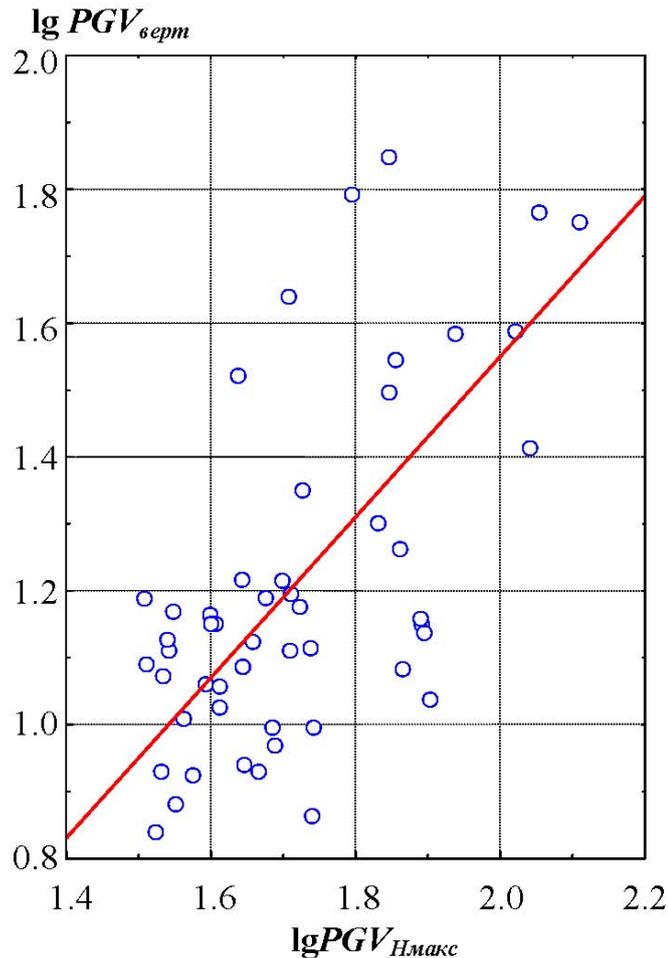
Изменение величины  $\lg (PGV_{\text{верт}} / PGV_{\text{Нмакс}})$  во всем рассматриваемом диапазоне расстояний не превышает стандартного отклонения. Итак, зависимостью от расстояния также можно пренебречь.

Аналогичная картина наблюдается и в ближней зоне.

Заметим, что магнитуа и расстояние в уравнении (4.23) 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 (4.23) неадекватно описывает реальные зависимости. Недаром распределение величины  $\lg(PGV_{верт} / PGV_{Hмакс})$  без учета каких-либо факторов (см. рисунок 4.13) имеет более низкое стандартное отклонение.

Рассмотрим соотношение уровней вертикальной и максимальной горизонтальной компоненты в ближней и дальней зонах отдельно.

На рисунке 4.17 показано исследуемое соотношение для ближней зоны.



Кружки - эмпирические данные (58 событий),  
красная линия – аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.17 - Зависимость  $PGV_{верт}$  от  $PGV_{Hмакс}$  в ближней зоне

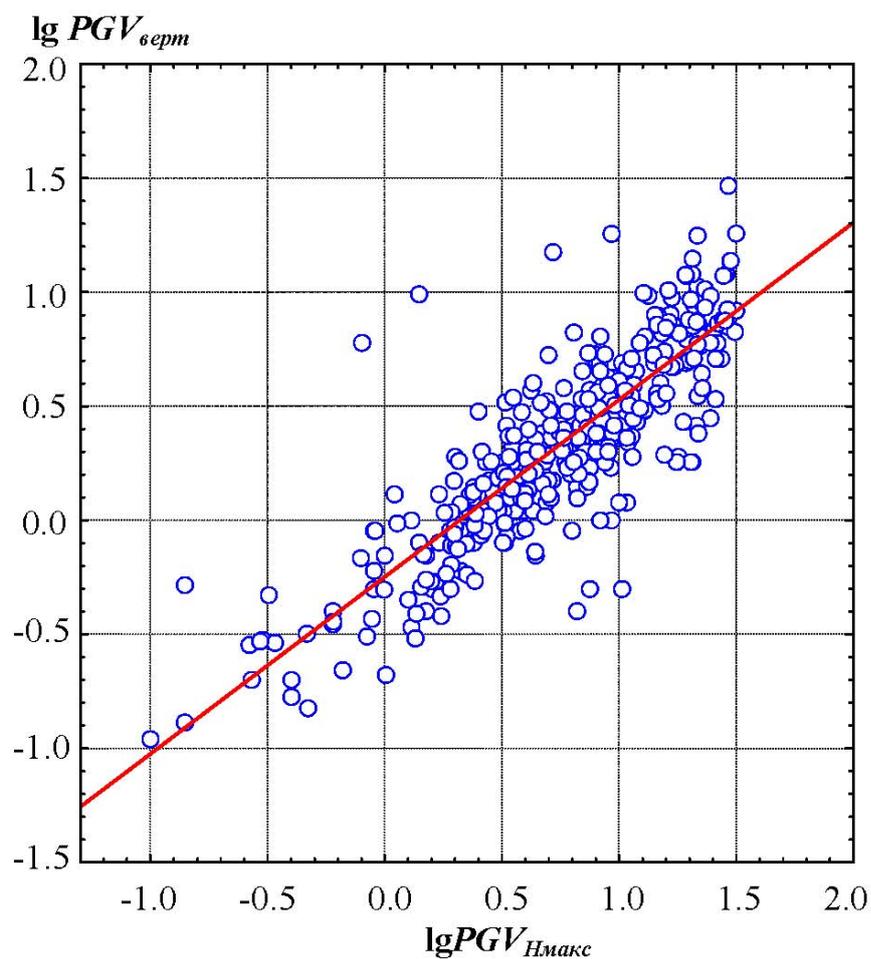
Соответствующее уравнение аппроксимирующей прямой имеет вид:

$$\lg PGV_{верт} = 1.20 \lg PGV_{Hмакс} - 0.85 \pm 0.14, \quad (4.25)$$

а в дальней зоне (рисунок 4.18) получено соотношение

$$\lg PGV_{верт} = 0.78 \lg PGV_{Hмакс} - 0.25 \pm 0.20. \quad (4.26)$$

Коэффициент корреляции этого соотношения высок  $r = 0.87$ .



Кружки - эмпирические данные (379 событий),  
красная линия – аппроксимирующая прямая

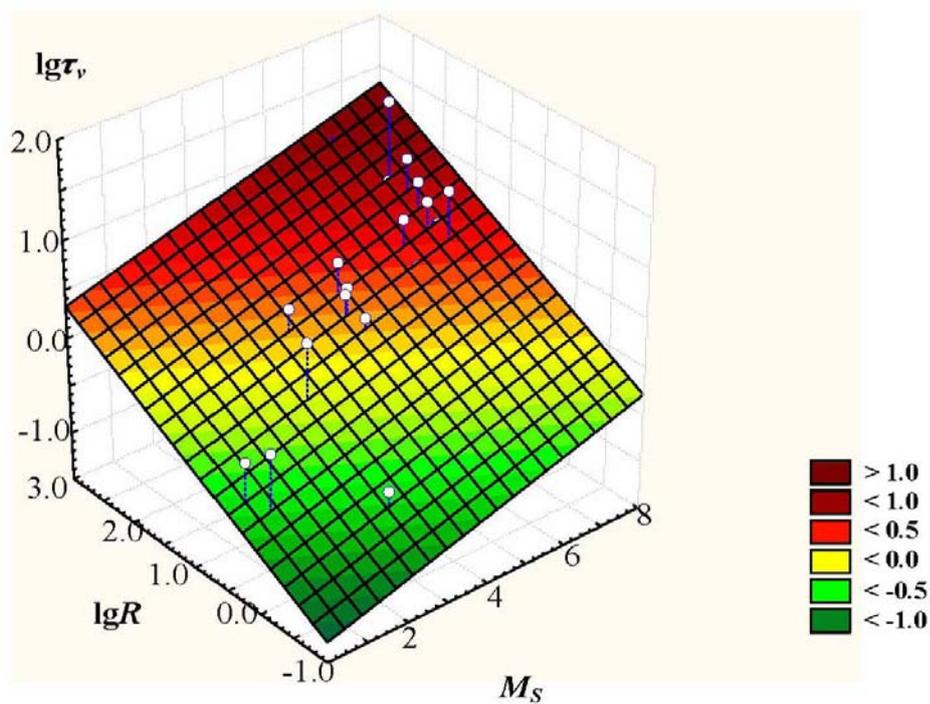
Рисунок 4.18 - Зависимость  $PGV_{верт}$  от  $PGV_{Hмакс}$  в дальней зоне

Зависимость от других факторов – как это было сделано для ускорений (см. главу 3) - изучить не удалось из-за недостатка данных.

#### 4.4 Продолжительность колебаний скорости

Распределение данных (56 случаев) по продолжительности колебаний  $\tau_v$  для дальней зоны показано на рисунке 4.19. Эмпирическая формула имеет вид:

$$\lg \tau_v = 0.12 M_S + 0.40 \lg R - 0.88 \pm 0.40. \quad (4.27)$$



Кружки - эмпирические данные (56 событий)

Рисунок 4.19 - Зависимость логарифма продолжительности колебаний скорости  $\lg \tau_v$  от магнитуды ( $M_S$ ) и расстояния ( $\lg R$ ) в дальней зоне

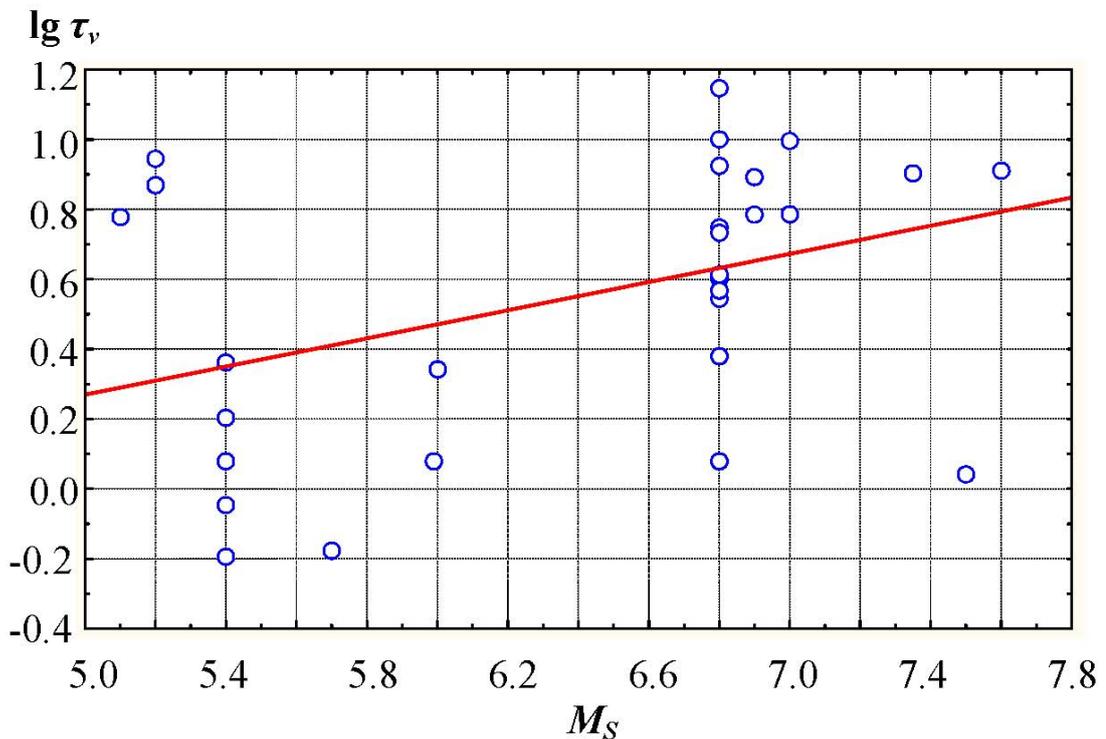
Как видно из уравнения (4.27), возрастание продолжительности колебаний в дальней зоне связано, прежде всего, с удалением от очага.

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:

$$\lg \tau_v = 0.20 M_S - 0.74 \pm 0.23. \quad (4.28)$$

Можно отметить следующую тенденцию: в ближней зоне чем больше магнитуда (т.е. чем больше выделяющаяся энергия), тем продолжительнее процесс колебания (рисунок 4.20):



Кружки - эмпирические данные (67 событий), красная линия – аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.20 - Зависимость  $\lg \tau_v$  от  $M_S$  в ближней зоне

#### 4.5 Спектры реакции в скоростях

По выборке из имеющейся базы данных (см. главу 2) были рассчитаны спектры реакции в скоростях при 5%-ном затухании. Затем, применяя

разработанную в работе [Аптикаев. 1981] и кратко изложенную выше систему параметризации записей сильных движений грунта (см. главу 2), были рассмотрены основные параметры спектров реакции, их взаимосвязи и зависимости от различных факторов. Эмпирические распределения аппроксимировались по закону Гаусса.

Кроме того, каждый из полученных спектров нормировался по своему спектральному максимальному значению и соответствующему преобладающему периоду. Рассмотрение совокупности нормированных таким образом спектров позволило установить среднюю форму спектра реакции в скоростях и описать его характерные черты.

Для всех рассмотренных параметров найдены средние значения и соответствующие стандартные отклонения.

#### 4.5.1 Асимметрия и крутизна склонов

Для оценки асимметрии спектра рассмотрим соотношение длинно- и короткопериодной логарифмической полуширины спектра реакции.

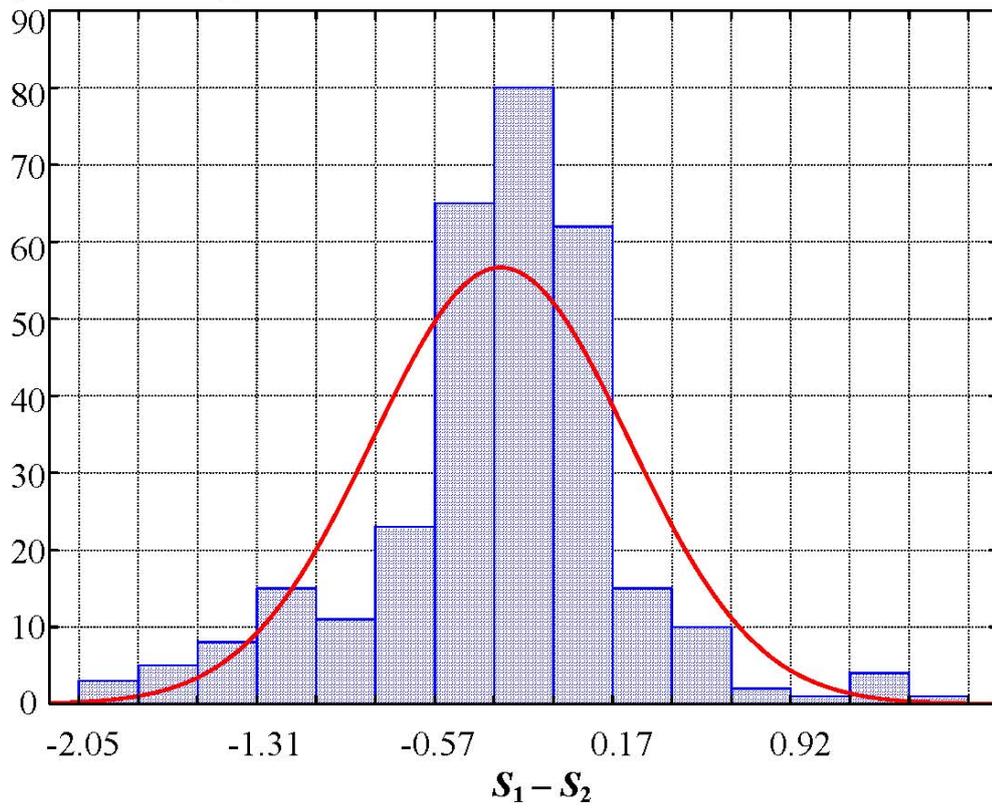
На рисунке 4.21 приведено распределение величины  $S_1 - S_2$  на уровне 0.5 от максимального, а на рисунках 4.22 – 4.23 - распределения величин  $S_2$  и  $S_1$  на том же самом уровне 0.5 ( $S_{205}$  и  $S_{105}$  соответственно). Как видно из рисунка 4.21, спектр скорости ( $SV$ ) несимметричен на уровне полумаксимума  $SV = 0.5 SV_{\text{макс}}$ . При этом огибающая эмпирического распределения для логарифма короткопериодной части (рисунок 4.22) имеет вид:

$$\lg S_{105} = - 0.60 \pm 0.30, \quad (4.29)$$

а огибающая распределения для логарифма длиннопериодной части (рисунок 4.23) имеет параметры:

$$\lg S_{205} = - 0.31 \pm 0.31. \quad (4.30)$$

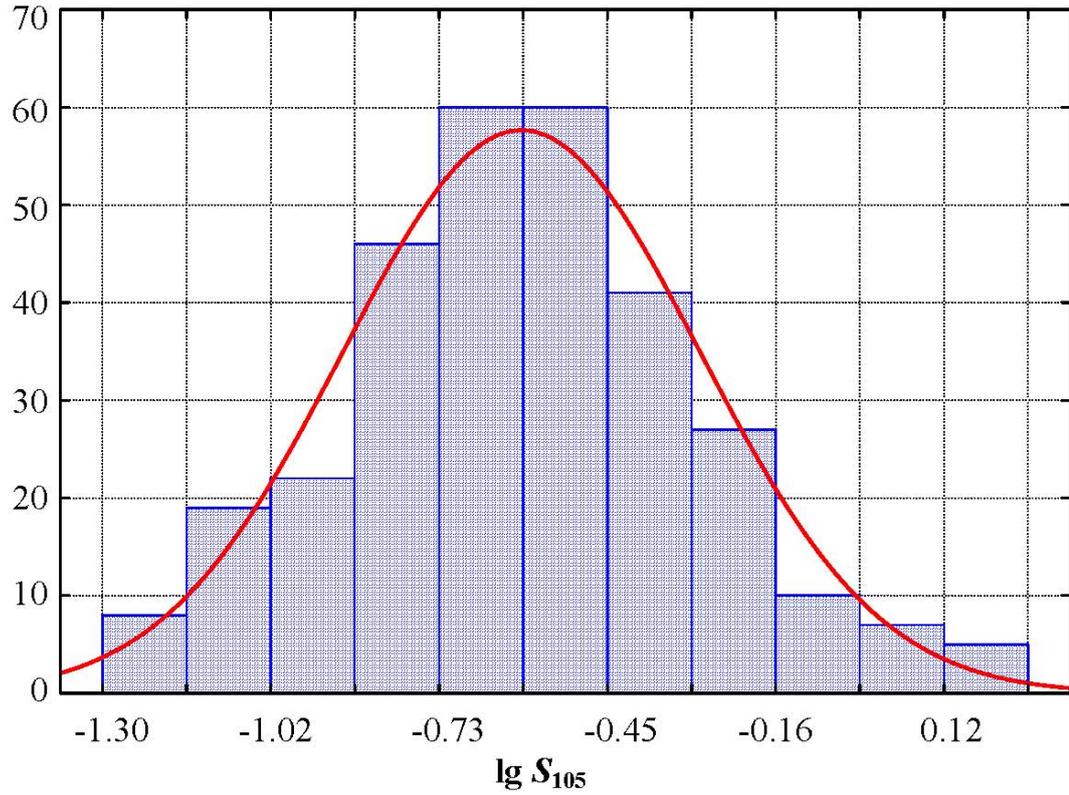
$N$ , к-во наблюдений



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $-0.30 \pm 0.53$

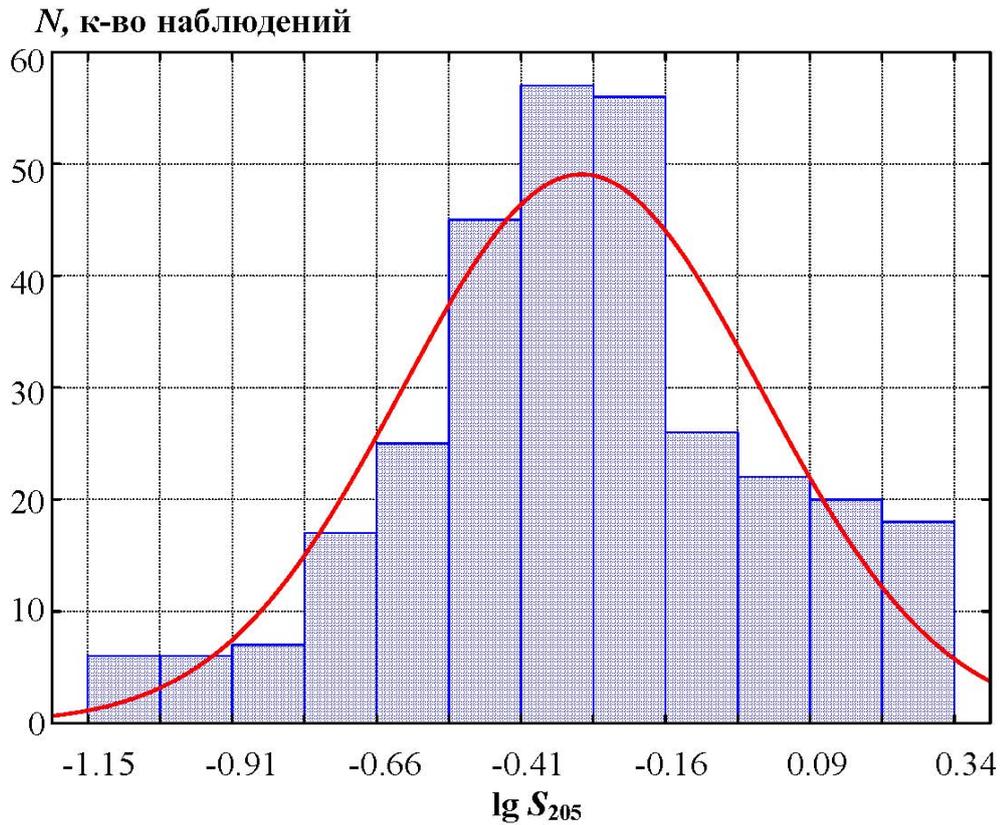
Рисунок 4.21 - Распределение  $S_1 - S_2$  на уровне 0.5 (305 событий)

$N$ , к-во наблюдений



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $-0.60 \pm 0.30$

Рисунок 4.22 - Распределение логарифма короткопериодной логарифмической полуширины спектра  $S_1$  на уровне 0.5 (305 событий)



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $-0.31 \pm 0.31$

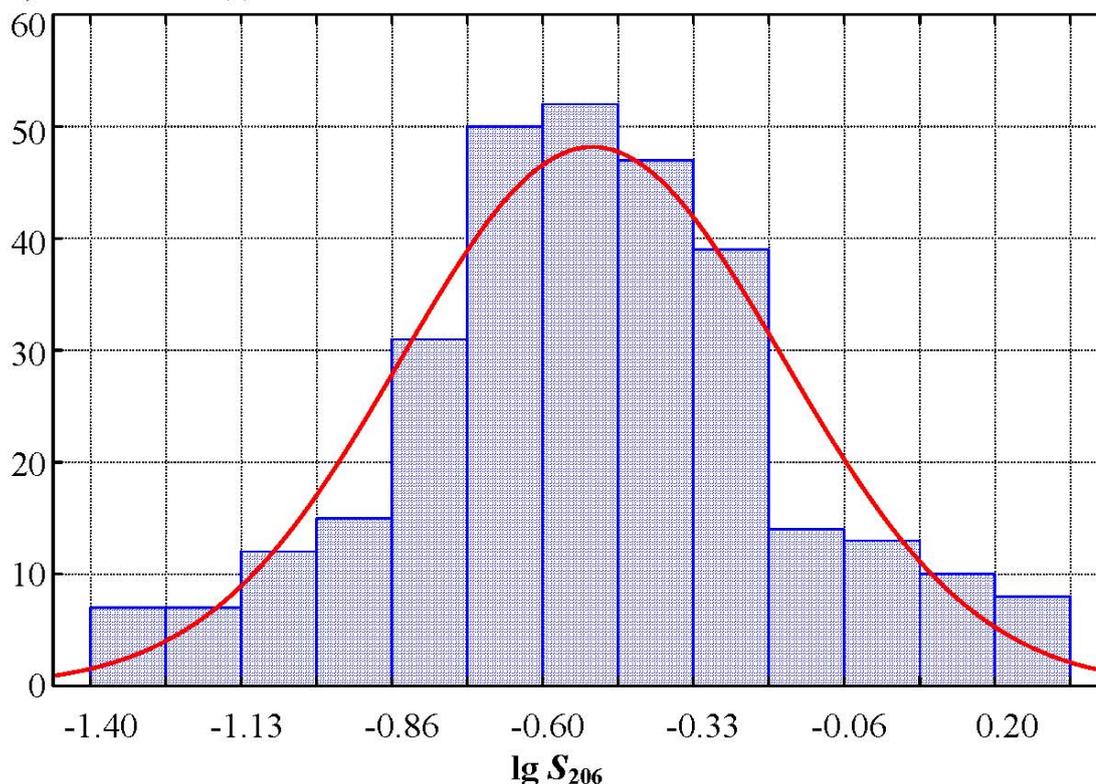
Рисунок 4.23 - Распределение логарифма длиннопериодной логарифмической полуширины спектра  $S_2$  на уровне 0.5 (305 событий)

На рисунке 4.23 хорошо видно отклонение от нормального закона для больших значений длиннопериодной полуширины спектра.

Из сравнения выражений (4.29) и (4.30) можно сделать вывод, что на уровне  $0.5 SV_{\max}$  у спектра скорости длиннопериодная часть является более широкой (почти в 2 раза) по сравнению с короткопериодной. Среднее значение короткопериодной полуширины спектра составляет  $S_1 = 0.62 \pm 0.45$ , а среднее значение длиннопериодной полуширины -  $S_2 = 0.32 \pm 0.26$ .

Аналогичные распределения были проанализированы для всех уровней от  $0.1 \lg SV_{\max}$  до  $0.9 \lg SV_{\max}$  с шагом 0.1. Для примера на рисунке 4.24 приведено эмпирическое распределение логарифма длиннопериодной логарифмической полуширины спектра  $S_2$  на уровне 0.6 ( $\lg S_{206}$ ).

$N$ , к-во наблюдений



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $-0.51 \pm 0.34$

Рисунок 4.24 - Пример распределения логарифма длиннопериодной логарифмической полуширины спектра  $S_2$  на уровне 0.6 (305 событий)

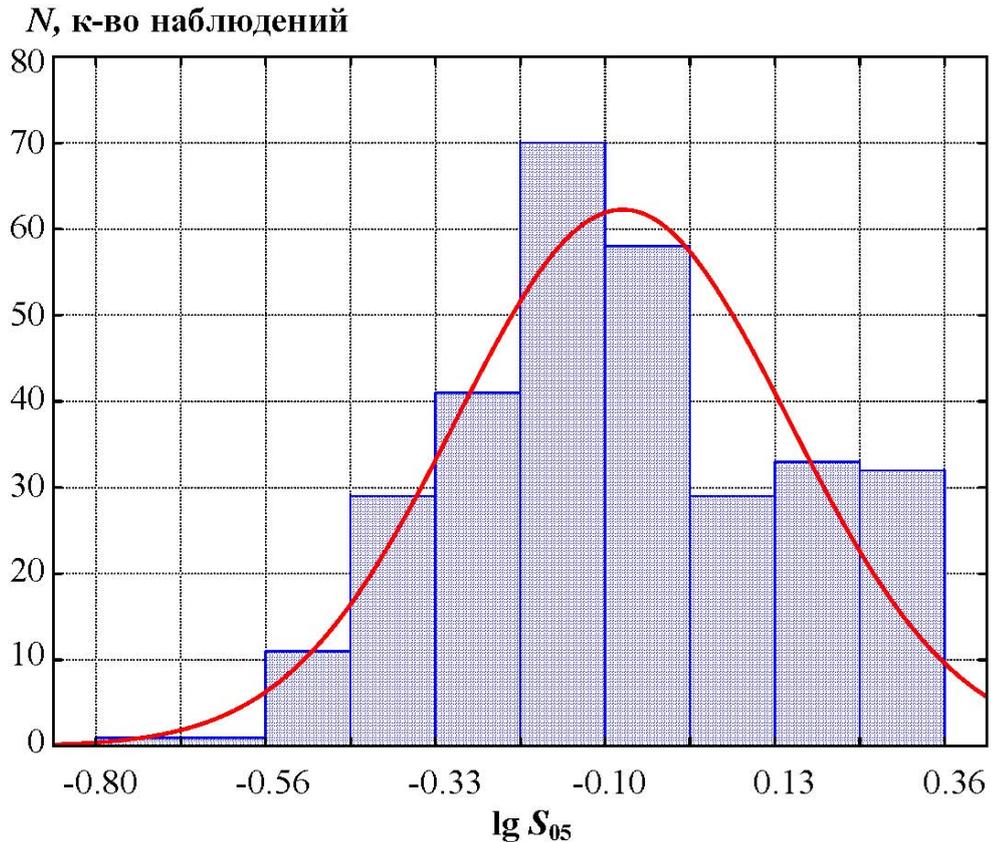
Огибающая упомянутого распределения имеет параметры

$$\lg S_{206} = -0.51 \pm 0.34.$$

Длиннопериодная часть спектра остается открытой в сторону длинных периодов примерно на уровне  $0.37 SV_{\max}$ . При этом величина длиннопериодной полуширины спектра всегда больше величины короткопериодной полуширины, т.е. асимметрия спектра сохраняется на всех уровнях.

### 4.5.2 Логарифмическая ширина

Для логарифмической ширины спектра  $S = S_1 + S_2$  также построены эмпирические распределения на всех уровнях от  $0.1 \lg SV_{\max}$  до  $0.9 \lg SV_{\max}$  с шагом 0.1. Для примера на рисунке 4.25 показано распределение  $\lg S$  на уровне  $0.5 SV_{\max}$ .



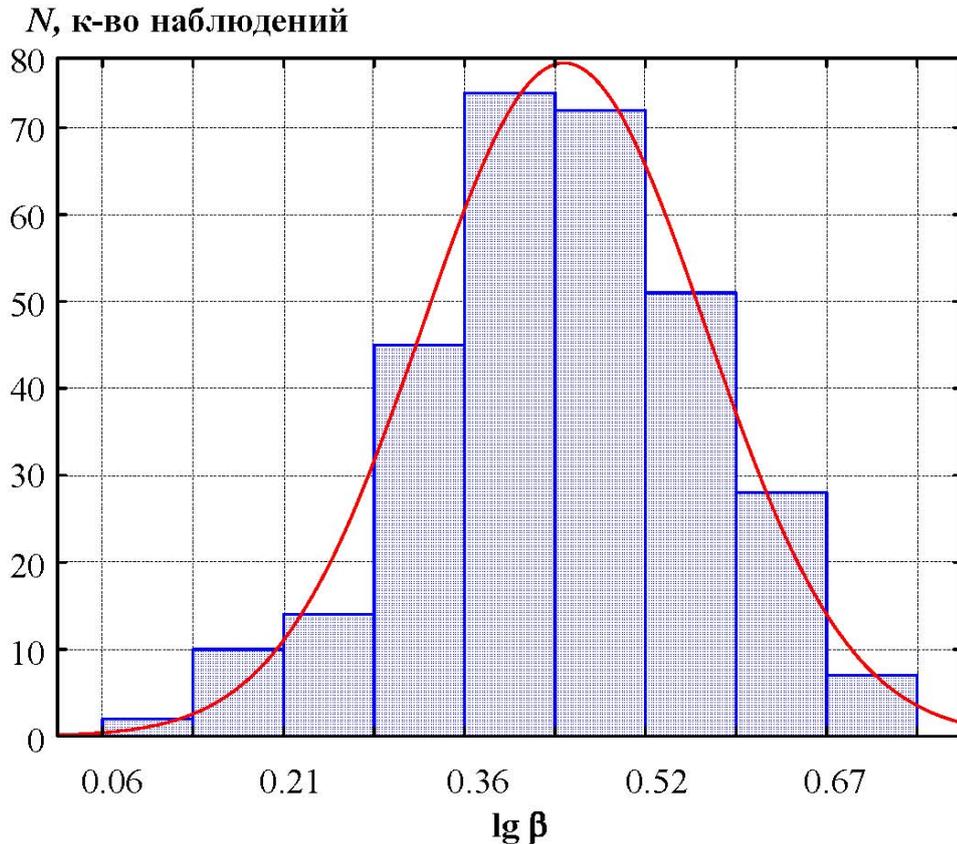
Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $-0.08 \pm 0.23$

Рисунок 4.25 - Распределение логарифмической ширины спектра на уровне 0.5 (305 событий)

Поскольку, как описано выше, спектр скорости открыт в сторону длинных периодов примерно с уровня  $0.37 SV_{\max}$  то, естественно, и говорить о полной логарифмической ширине спектра скорости  $S$  имеет смысл лишь выше указанного уровня. На более низких уровнях форма спектра описывается лишь шириной короткопериодной части. По сравнению со спектром ускорения следует отметить, что спектр скорости по частотному составу в целом оказывается значительно шире (примерно в полтора раза), среднее значение  $S = 0.94 \pm 0.50$ .

### 4.5.3 Коэффициент динамического усиления

Коэффициент динамического усиления является одной из важнейших характеристик спектра реакции. Эмпирическое распределение величины  $\lg \beta$  (при демпфировании 5%) показано на рисунке 4.26.



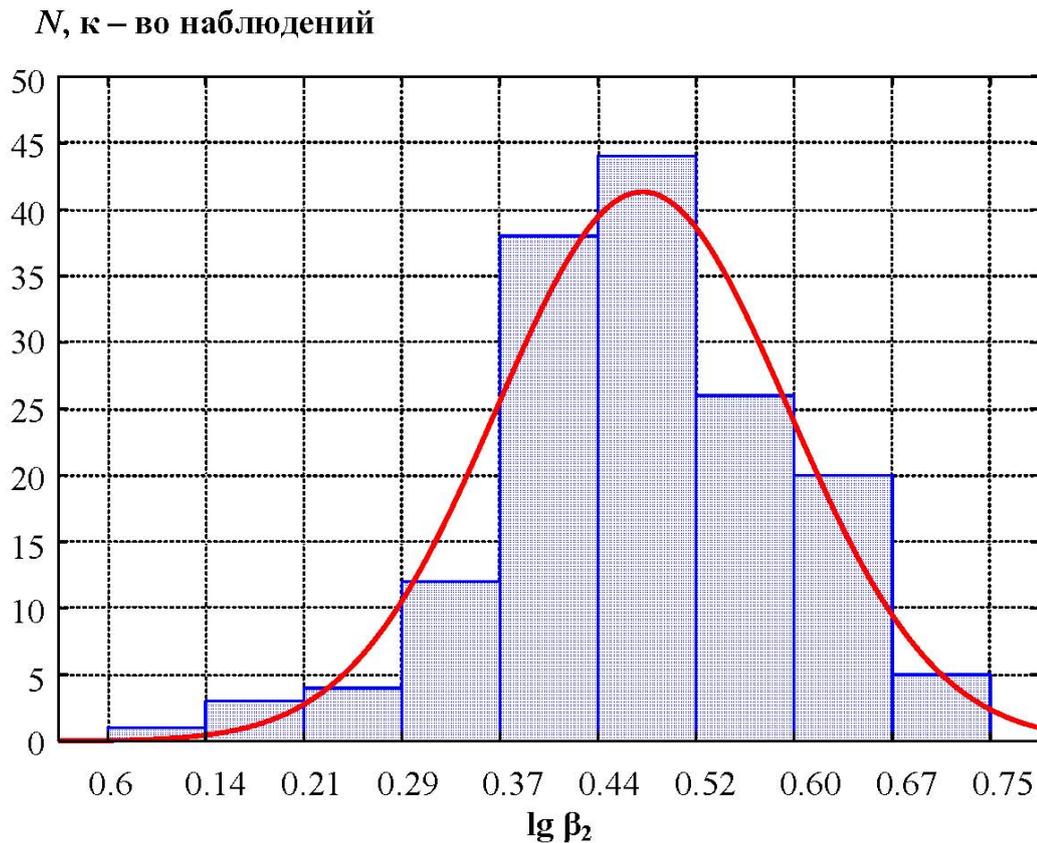
Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.45 \pm 0.12$

Рисунок 4.26 - Распределение  $\lg \beta$  (303 события)

Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.45 \pm 0.12$ . Откуда получаем, что среднее значение коэффициента динамического усиления  $\beta$  для спектров скорости составляет примерно 2.8. Эта же величина для спектров ускорения при таком же демпфировании 5% больше и составляет, по нашим оценкам, в среднем 3.6 [Аптикаев, Эртелева, 2008а]. При этом разброс оценок – величина стандартного отклонения – больше: примерно 32% для скоростей против 26% для ускорений.

### 4.5.3.1 Коэффициент динамического усиления второй горизонтальной компоненты

По имеющейся базе данных сильных движений построим эмпирическое распределение коэффициента динамического усиления второй горизонтальной компоненты  $\lg \beta_2$ . Полученное эмпирическое распределение (при демпфировании 5%) показано на рисунке 4.27.



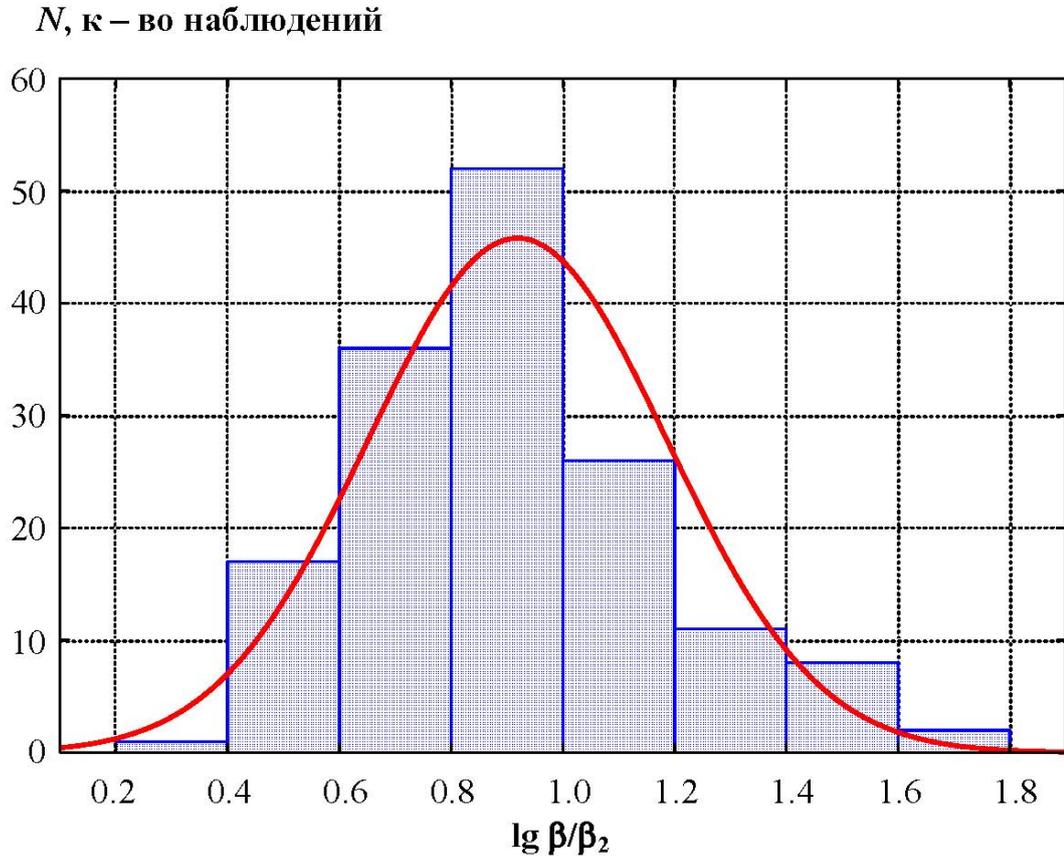
Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.47 \pm 0.11$

Рисунок 4.27 – Распределение  $\lg \beta_2$  (среднее значение  $\beta_2 = 2.98$ , 153 события)

Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.47 \pm 0.11$ . Откуда получаем, что среднее значение коэффициента динамического усиления  $\beta_2$  для второй горизонтальной компоненты составляет примерно 2.98, разброс оценок – величина стандартного отклонения – примерно 30%.

На рисунке 4.28 показано распределение разницы значений коэффициентов динамического усиления двух горизонтальных компонент. Анализируя полученный результат, приходим к выводу, что максимальная (по амплитуде)

горизонтальная компонента имеет меньший по сравнению со второй горизонтальной компонентой коэффициент  $\beta$  (см. рисунок 4.28) в среднем примерно на 0.18 ед. дес. лог.

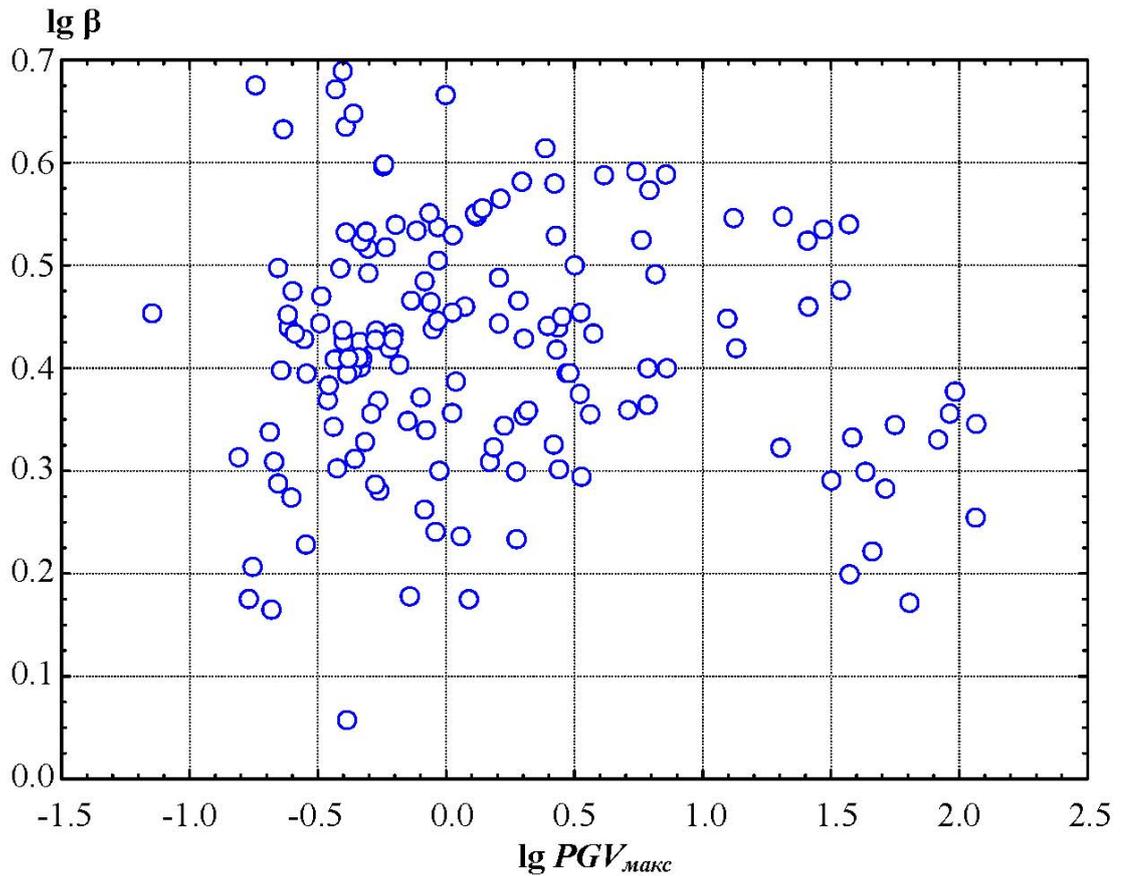


Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.91 \pm 0.27$

Рисунок 4.28– Распределение логарифма соотношения  $\beta / \beta_2$  (153 события)

#### 4.5.3.2 Зависимость коэффициента динамического усиления от пиковой амплитуды скорости колебаний

Исходные данные показаны на рисунке 4.29. Из приведенного рисунка отчетливо видно, что все имеющиеся значения  $\lg \beta$  распадаются на две области по отношению к логарифму значения пиковой скорости. Такой пограничной точкой служит значение  $PGV \approx 20$  см/с. Если обратиться к результатам раздела 4.2, то можно сделать вывод, что это значение соответствует положению границы между



Кружки - эмпирические данные (153 события)

Рисунок 4.29 – Соотношение между логарифмами коэффициента динамического усиления  $\lg \beta$  и пиковой скорости  $\lg PGV_{H_{\max}}$

ближней и дальней зонами. Следовательно, различия в зависимостях  $\beta$  от пиковой скорости определяются тем, где расположена исследуемая точка: в ближней или дальней зоне.

В таблице 4.2 приведены значения величины  $\beta$  и  $\lg \beta$  в интервалах шириной  $0.4 \lg PGV_{H_{\max}}$  с шагом 0.4 ед. дес. логарифма.

Из таблицы 4.2 следует, что, примерно после того как пиковая скорость достигает значения  $PGV_{H_{\max}} \approx 20$  см/с, величина  $\beta$  начинает резко уменьшаться. Возможно, такая скорость соответствует границе очага. Точнее установить эту границу не удалось вследствие недостатка данных.

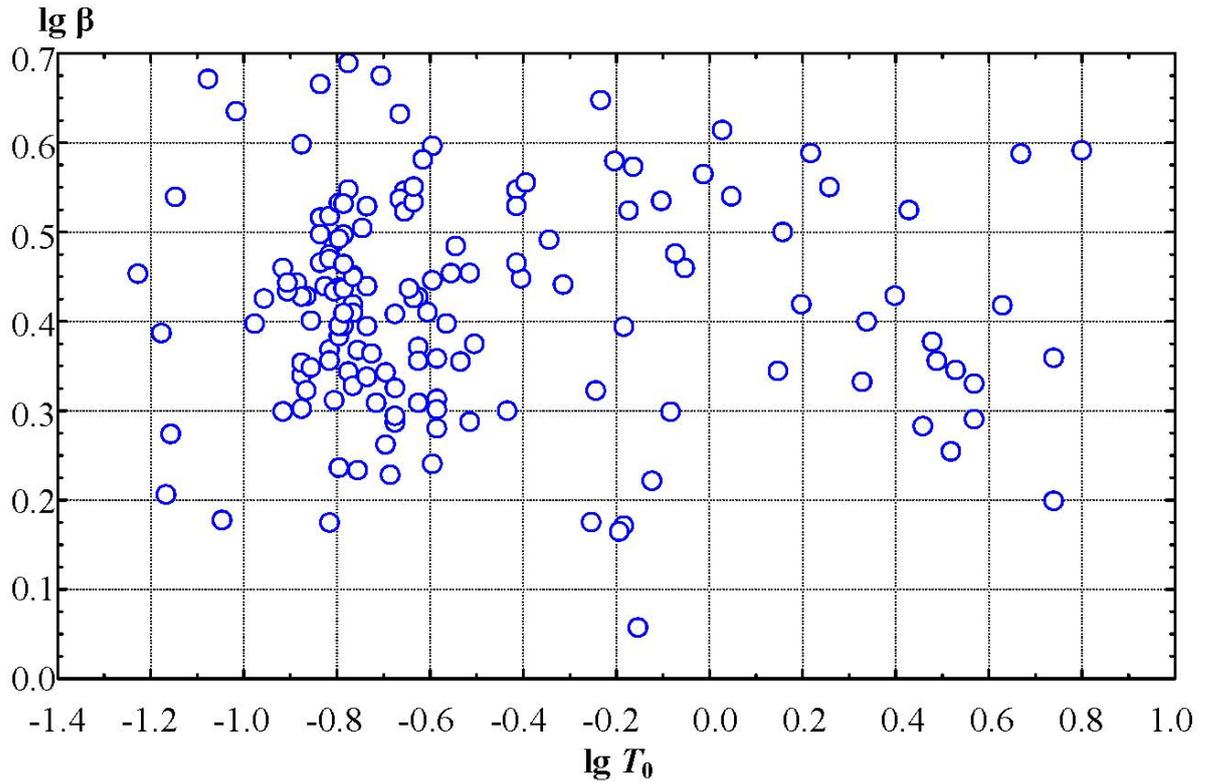
Таблица 4.2 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и пиковой скоростью колебаний  $PGV_{H_{\max}}$ , см/с

<b>lg <math>PGV_{H_{\max}}</math></b>	- 0.4	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
<b><math>PGV_{H_{\max}}</math></b>	0.4	1.0	2.5	6.3	16	30	100
<b>lg <math>\beta</math> <math>\pm \sigma</math></b>	0.42 $\pm 0.15$	0.42 $\pm 0.14$	0.42 $\pm 0.13$	0.40 $\pm 0.12$	0.49 $\pm 0.12$	0.38 $\pm 0.12$	0.34 $\pm 0.12$
<b><math>\beta</math></b>	2.6	2.6	2.6	2.6	2.8	2.4	2.2
<b>К-во данных, <math>N</math></b>	46	45	65	49	37	10	5
Пр и м е ч а н и е - $\sigma$ - стандартное отклонение							

#### 4.5.3.3 Зависимость коэффициента динамического усиления от преобладающего периода

Рассмотрим связь коэффициента  $\beta$  с преобладающим периодом колебаний. Исходные данные представлены на рисунке 4.30. В выборке самое малое значение преобладающего периода равно  $T_0 = 0.05$  с, а самое большое -  $T_0 = 6.3$  с.

Для выявления связи коэффициента  $\beta$  с периодом колебаний рассмотрим значения этой величины в узких диапазонах преобладающего периода (таблица 4.3).



Кружки - эмпирические данные (153 события)

Рисунок 4.30 – Соотношение между логарифмами коэффициента динамического усиления  $\lg \beta$  и значения преобладающего периода  $\lg T_0$

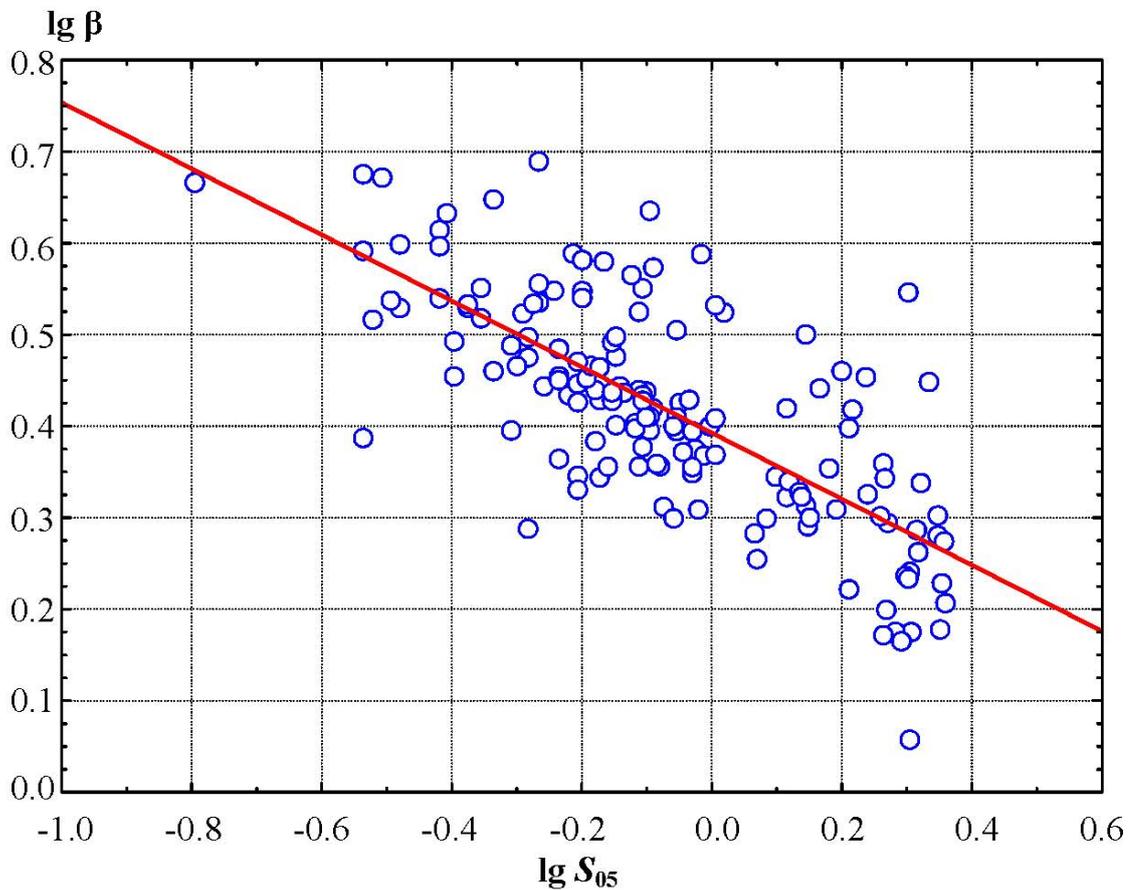
Таблица 4.3 - Соотношения между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  в различных интервалах преобладающего периода  $T_0$  колебаний

$T_0, c$	<0.1	0.15	0.20	0.30	0.50	1.00	2.00	4.00
$\pm \sigma$		$\pm 0.05$	$\pm 0.05$	$\pm 0.1$	$\pm 0.2$	$\pm 0.3$	$\pm 0.7$	$\pm 1.3$
$\lg \beta$	0.45	0.43	0.42	0.41	0.42	0.42	0.45	0.37
$\pm \sigma$	$\pm 0.19$	$\pm 0.12$	$\pm 0.11$	$\pm 0.12$	$\pm 0.14$	$\pm 0.19$	$\pm 0.19$	$\pm 0.12$
$\beta$	2.8	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.8	2.3
К-во данных, $N$	8	29	62	40	20	9	10	12
Примечание - $\sigma$ - стандартное отклонение								

Как следует из таблицы 4.3, заметная связь для этих величин отсутствует. Тем не менее, можно говорить о некотором снижении коэффициента  $\beta$  с увеличением периода (рисунок 4.30).

#### 4.5.3.4 Зависимость коэффициента динамического усиления от ширины спектра

Данная зависимость оказалась вполне классической: с ростом ширины спектра  $S$  коэффициент динамического усиления  $\beta$  уменьшается (см. рисунок 4.31).



Кружки - эмпирические данные (153 события),  
красная линия – аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.31 - Зависимость  $\lg \beta$  от ширины спектра  $\lg S_{05}$

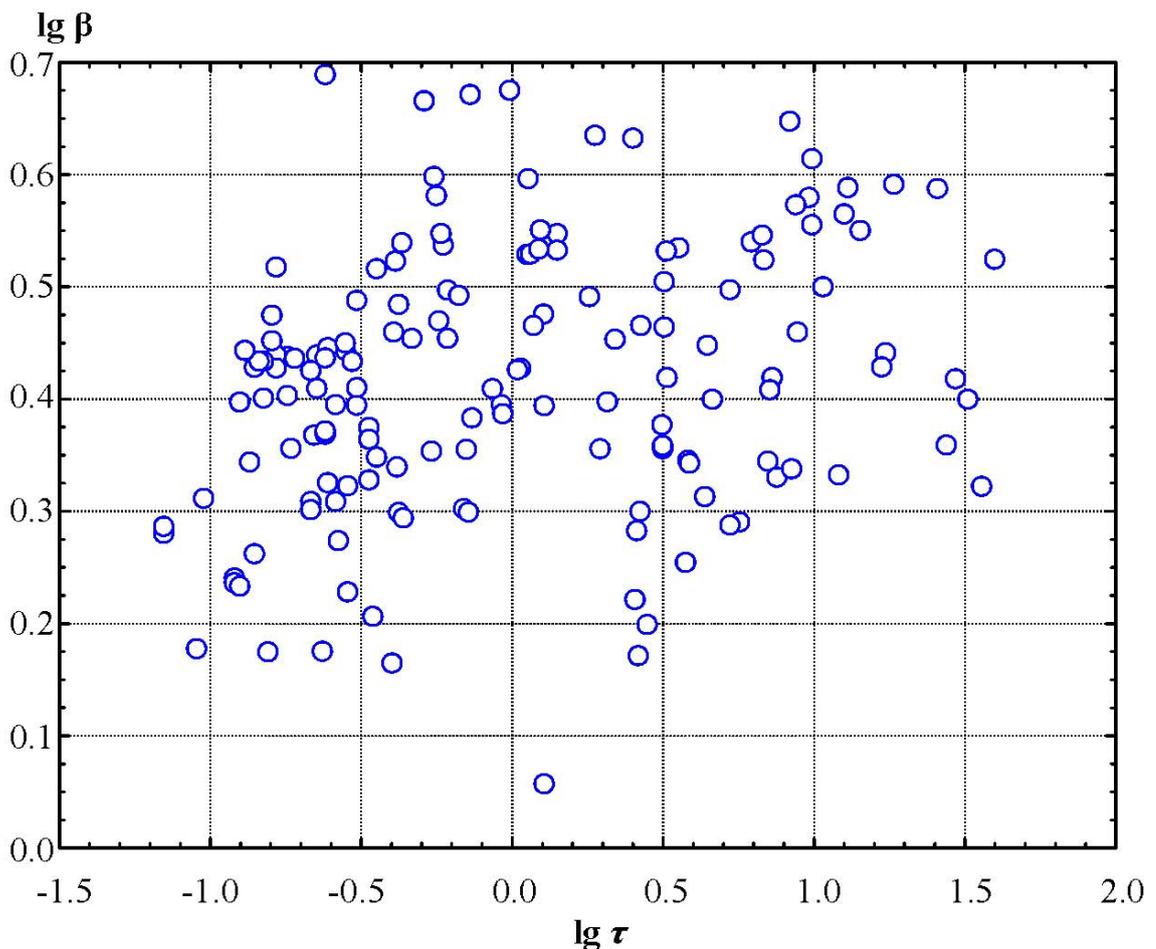
Установленная корреляционная формула имеет вид:

$$\lg \beta = 0.39 - 0.36 \lg S \pm 0.08. \quad (4.31)$$

Полученный результат довольно стабилен: коэффициент корреляции высок и составляет  $r \approx -0.73$ .

#### 4.5.3.5 Зависимость коэффициента динамического усиления от продолжительности колебаний

Исходные данные о соотношении величин  $\lg \beta$  и  $\lg \tau$  показаны на рисунке 4.32. Из рисунка видно, что существенная зависимость может иметь место только при малых значениях  $\lg \tau$ .



Кружки - эмпирические данные (153 события)

Рисунок 4.32 – Соотношение между  $\lg \beta$  и продолжительностью колебаний  $\lg \tau$

Для количественной оценки такой зависимости разобьем значения величины  $\lg \tau$  на интервалы шириной в 0.2 ед. дес. логарифма. В каждом интервале вычислим среднее значение величины  $\lg \beta$  и соответствующее стандартное отклонение. Полученные результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Зависимость логарифма коэффициента динамического усиления  $\lg \beta$  от логарифма продолжительности колебаний  $\lg \tau$

<b><math>\lg \tau</math></b>	$\leq - 1.0$	- 0.9	- 0.7	- 0.5	- 0.3	- 0.1	0.1	0.3
<b><math>\lg \beta</math></b>	0.26	0.34	0.41	0.38	0.46	0.44	0.47	0.48
<b><math>\pm \sigma</math></b>		$\pm 0.10$	$\pm 0.10$	$\pm 0.10$	$\pm 0.13$	$\pm 0.13$	$\pm 0.11$	$\pm 0.13$
<b><math>\beta</math></b>	1.8	2.2	2.6	2.4	2.9	2.8	2.95	3.0
<b>К-во данных, <math>N</math>,</b>	4	12	22	39	18	10	13	19
Пр и м е ч а н и е - $\sigma$ - стандартное отклонение								

Из таблицы 4.4 следует, 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. дес. логарифма.

#### 4.5.3.6 Зависимость коэффициента динамического усиления от количества циклов

Естественно считать, что степень раскачки системы зависит от количества колебаний. Поэтому нами были построены гистограммы для величины  $\lg \beta$  для разных значений количества циклов  $n$ . Для  $n = 1$ , когда в колебаниях выделяется по амплитуде только один экстремум, ширина интервала составляла половину цикла, для  $n = 2$  - один цикл, а затем, для  $n \geq 2$  - 2 цикла. Это связано с уменьшением количества случаев для больших  $n$ . Результаты измерений представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Соотношение между коэффициентом динамического усиления  $\beta$  и количеством циклов  $n$

$n$	0.5	1.0	1.5	2	3-4	5-6	7-8	>10
$\lg \beta$	0.24	0.35	0.42	0.40	0.46	0.44	0.44	0.47
$\pm \sigma$	$\pm 0.05$	$\pm 0.08$	$\pm 0.11$	$\pm 0.10$	$\pm 0.12$	$\pm 0.11$	$\pm 0.11$	$\pm 0.10$
$\beta$	1.7	2.2	2.6	2.5	2.9	2.8	2.8	3.0
<b>К-во данных, <math>N</math>,</b>	11	39	12	25	22	18	8	27
Пр и м е ч а н и е - $\sigma$ - стандартное отклонение								

Из таблицы следует, 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. В среднем количество циклов при землетрясениях составляет 3 - 4.

#### 4.5.4 Преобладающий период спектра реакции в скоростях

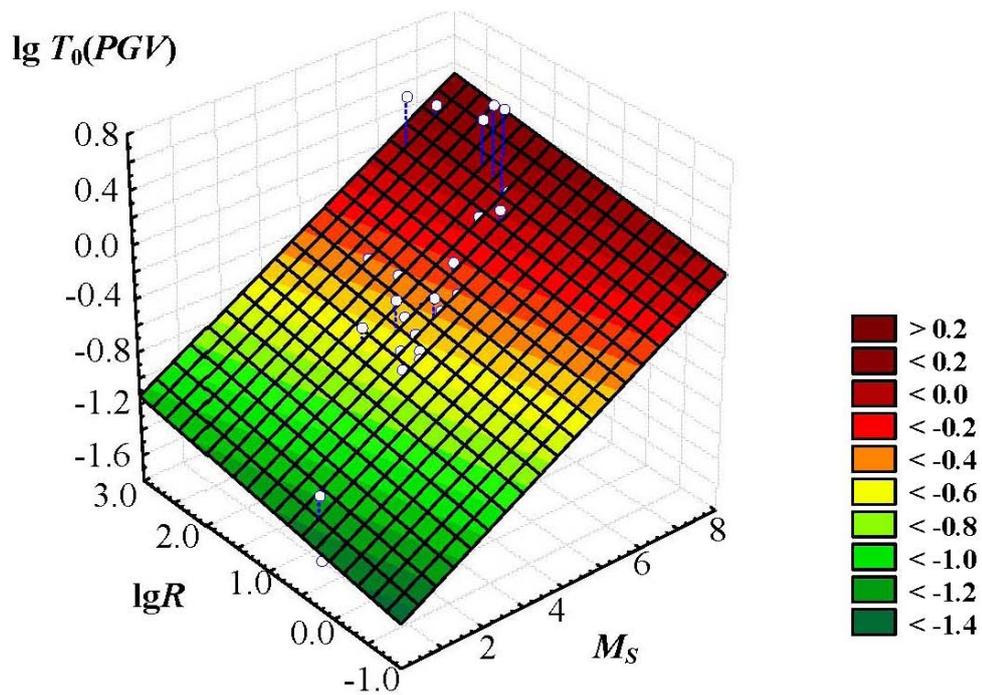
##### 4.5.4.1 Зависимость преобладающего периода от магнитуды и расстояния

Как известно, в общем случае [Kramer, 2009; Rathje et al., 2004; Аптикаев, Эртелева, 2002 и др.] величина преобладающего периода ускорения  $T_0(PGA)$  зависит от магнитуды события  $M_S$  и расстояния  $R$ , т.е.  $T_0(PGA) = f(M_S, R)$ . В то же время, преобладающие периоды скорости  $T_0(PGV)$  и ускорения  $T_0(PGA)$  не только пропорциональны, но, как было показано выше (см. главу 3), связаны соотношением  $T_0(PGV) / T_0(PGA) \approx 2.7$ .

Но тогда очевидно, что существует некая функция  $f(M_S, R)$  такая, что  $T_0(PGV) = f(M_S, R)$ , т.е. величина преобладающего периода скорости также зависит от магнитуды и расстояния. Для установления таких зависимостей рассмотрим отдельно данные, относящиеся к ближней и дальней зонам, используя разработанную кривую затухания пиковых амплитуд скорости (см. раздел 4.2).

В дальней зоне эмпирическое распределение данных по преобладающим периодам из имеющейся базы данных - выборка составила 59 случаев - приведено на рисунке 4.33, а соотношение между преобладающим периодом, магнитудой события и расстоянием имеет вид:

$$\lg T_0(PGV) = 0.18 M_S + 0.08 \lg R - 1.38 \pm 0.29. \quad (4.32)$$



Кружки - эмпирические данные (59 случаев)

Рисунок 4.33 - Зависимость преобладающего периода скорости  $\lg T_0(PGV)$  от магнитуды ( $M_S$ ) и расстояния ( $\lg R$ ) в дальней зоне (59 случаев)

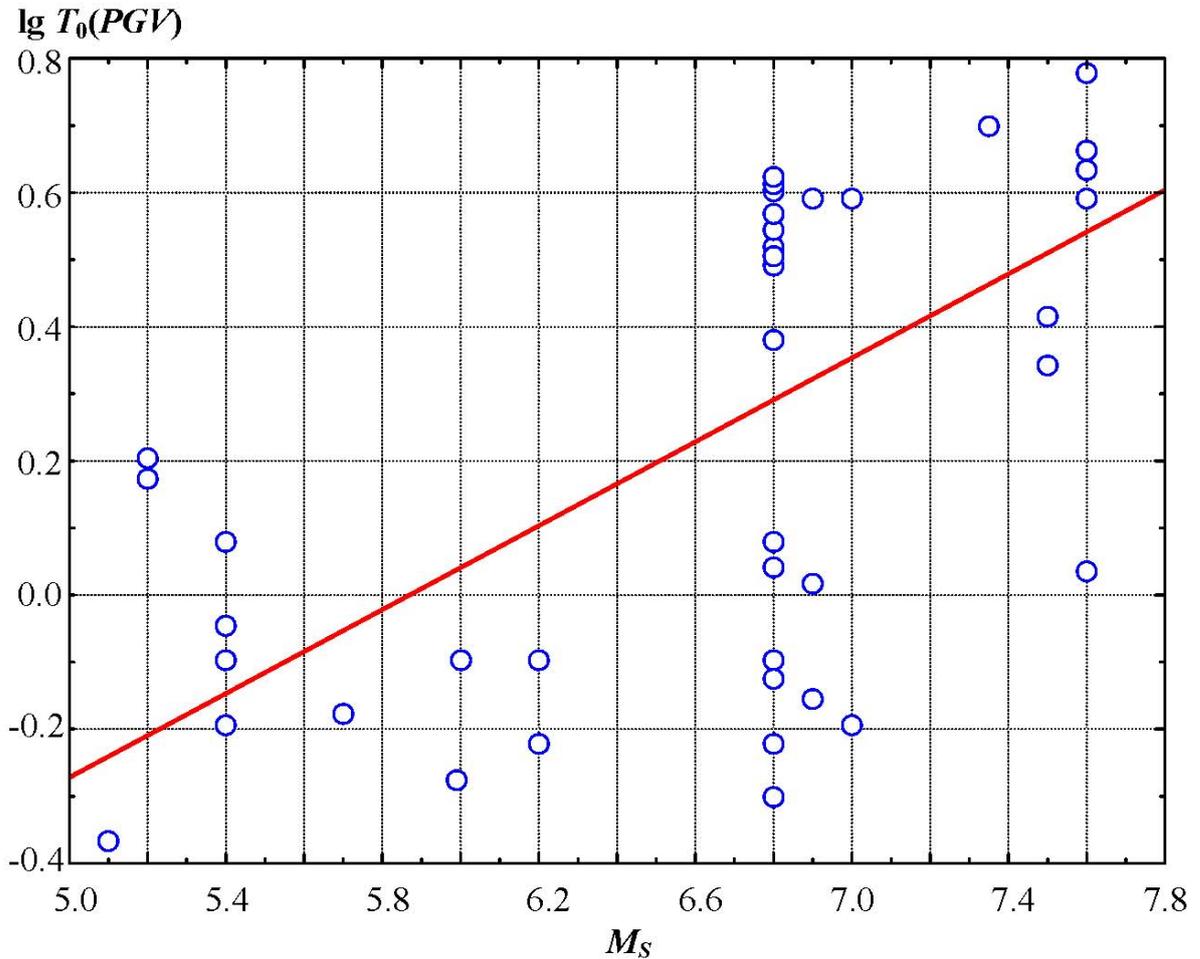
Коэффициент корреляции соотношения (4.32) высок и составляет  $r = 0.81$ .

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:

$$\lg T_0(PGV) = 0.31 M_S - 1.84 \pm 0.20 \quad (4.33)$$

Коэффициент корреляции  $r = 0.64$ . Эта зависимость графически показана на рисунке 4.34.



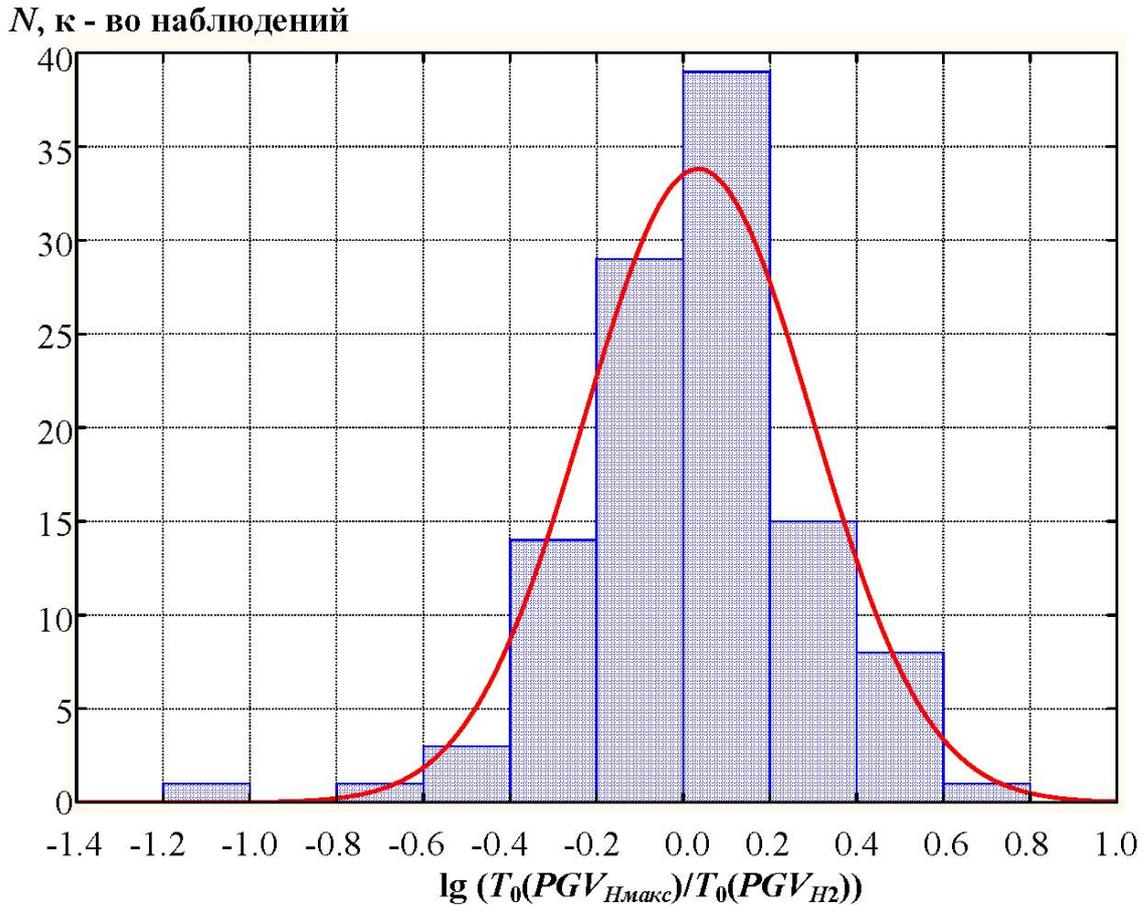
Кружки - эмпирические данные (67 событий),  
красная линия – аппроксимирующая прямая

Рисунок 4.34 - Зависимость преобладающего периода скорости  $\lg T_0(PGV)$  от магнитуды ( $M_S$ ) в ближней зоне

В ближней зоне каждый элемент среды выделяет энергию. За пределами очаговой области, затухание резко возрастает.

#### 4.5.4.2 Соотношение преобладающих периодов горизонтальных компонент

Посмотрим, насколько разнятся преобладающие периоды горизонтальных компонент. Гистограмма логарифма отношений преобладающих периодов горизонтальных компонент скорости представлена на рисунке 4.35. Как видим,



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.03 \pm 0.26$  (111 случаев)

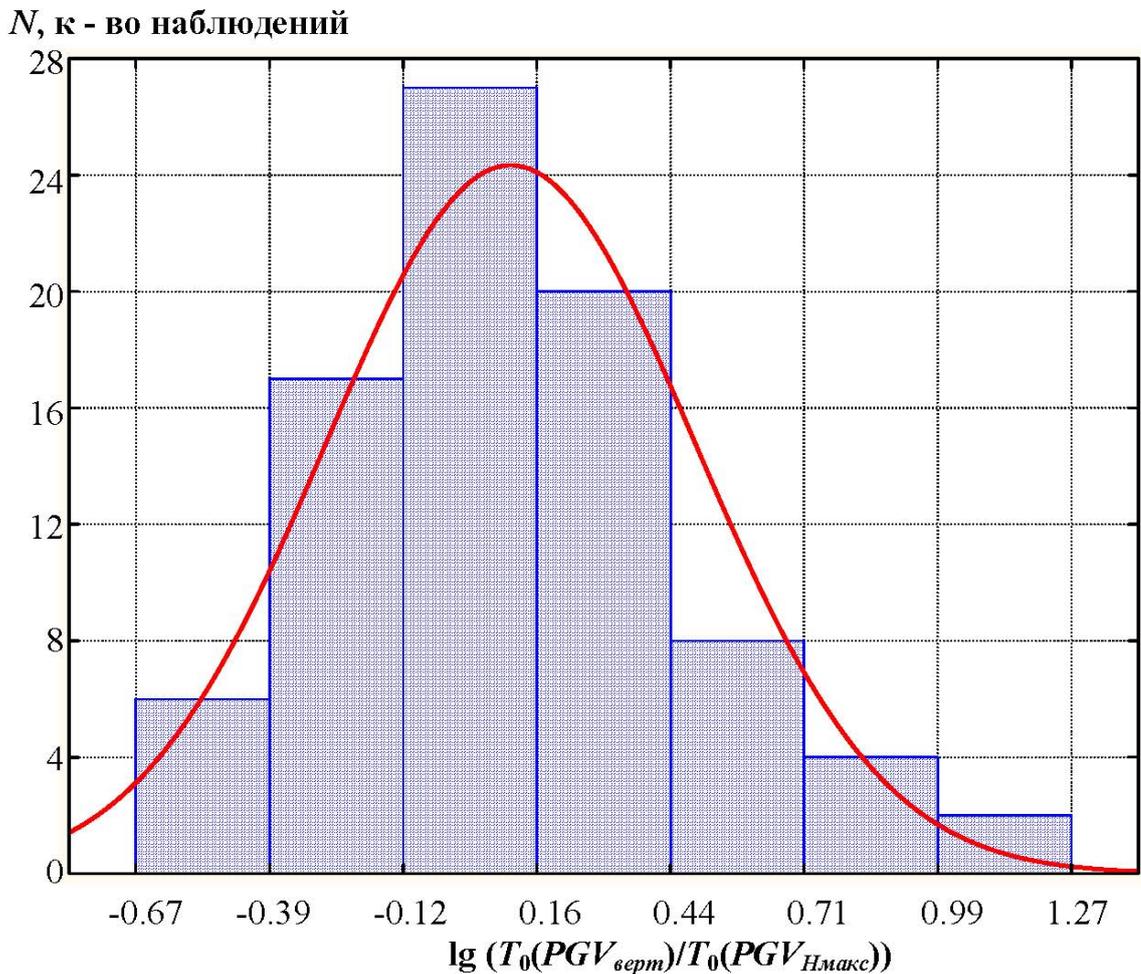
Рисунок 4.35 - Отношение преобладающих периодов двух горизонтальных компонент (среднее значение 0.02 ед. дес. логарифма)

преобладающие периоды горизонтальных компонент практически совпадают (среднее значение 0.03 ед. дес. логарифма). Преобладающий период на более интенсивной горизонтальной компоненте ( $T_0(PGV_{Hmax})$ ) больше на 6.5 % преобладающего периода второй горизонтальной компоненты ( $T_0(PGV_{H2})$ ) при стандартном отклонении 0.26 единиц десятичного логарифма. Следовательно,

разницей в преобладающих периодах колебаний на горизонтальных компонентах можно пренебречь.

#### 4.5.4.3 Преобладающий период скорости вертикальной компоненты

На рисунке 4.36 представлено распределение логарифмов отношения преобладающих периодов вертикальной ( $T_0(PGV_{верт})$ ) и максимальной горизонтальной компоненты ( $T_0(PGV_{Hмакс})$ ).



Огибающая – распределение Гаусса с параметрами  $0.10 \pm 0.38$  (84 события)

Рисунок 4.36 - Отношение преобладающих периодов вертикальной и максимальной горизонтальной компонент

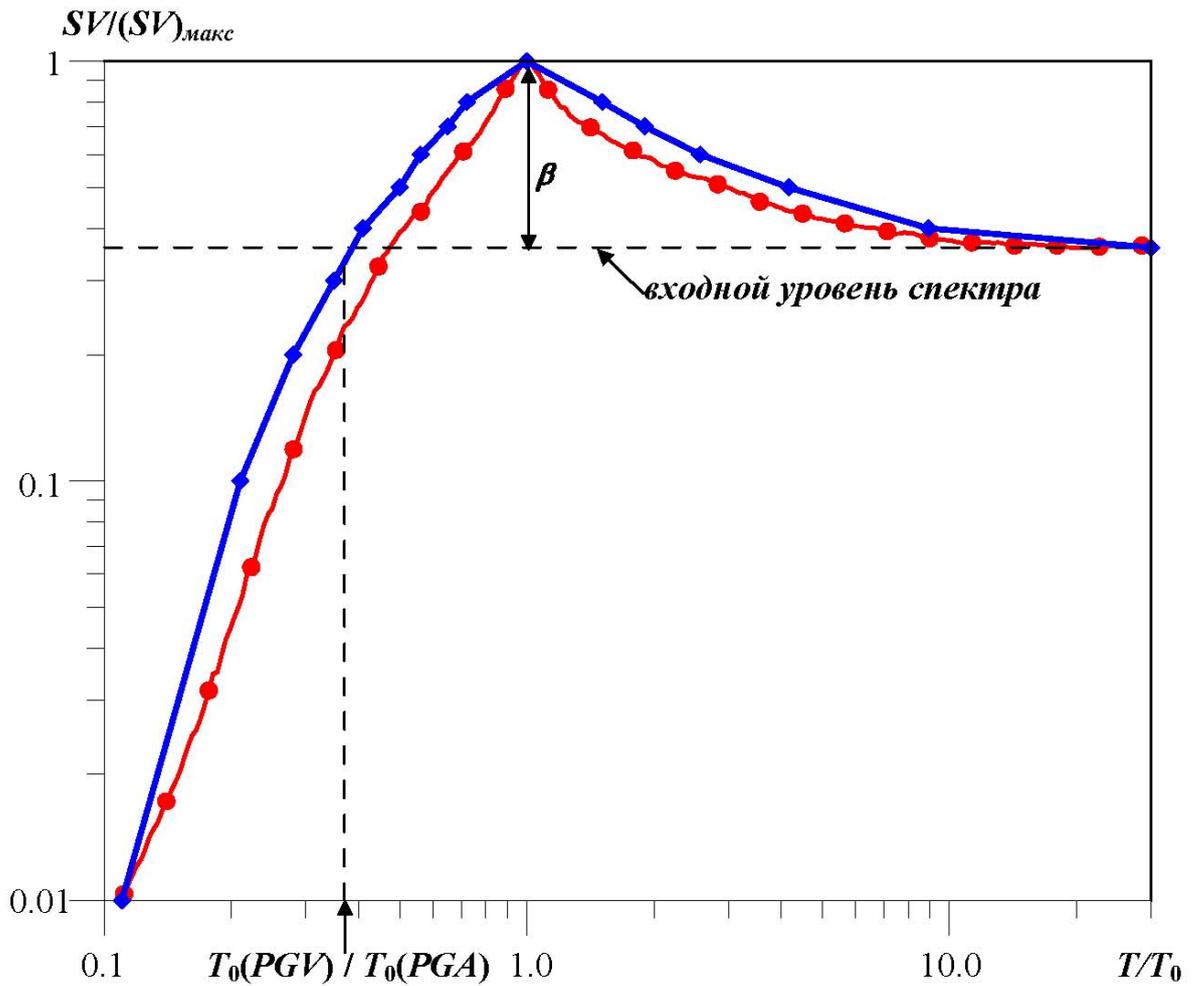
Как можно заметить, соотношение это в среднем составляет 0.10 ед. дес. логарифма, или, что то же самое, преобладающий период вертикальной

компоненты скорости на 26% (в 1.26 раза) превосходит преобладающий период максимальной компоненты. Учитывая результаты предыдущего пункта (см. раздел 4.5.4.2), можно сделать вывод, что  $(T_0(PGV_{верт}))$  больше преобладающего периода и второй горизонтальной компоненты  $(T_0(PGV_{H2}))$ . 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, которые обладают более длинными по сравнению с ускорениями периодами, максимальными амплитудами обладают  $S$ -волны, как на горизонтальных, так и на вертикальных компонентах. При этом в рассматриваемом диапазоне волна  $S$  распадается на  $SH$  – и  $SV$ -волны. Последние как раз и преобладают на записях вертикальных компонент.

#### 4.5.5 Средняя форма спектра реакции в скоростях

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. Рисунок 4.37 иллюстрирует результаты этой процедуры.

Из рисунка 4.37 видно, что 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  $\approx 0.37 SV / SV_{макс}$ , 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  $1/3$ .



Красная линия – медианы по столбцам, голубая линия – медианы по строкам. Видно, что периоды, соответствующие максимальным амплитудам смещений, в имеющейся выборке практически отсутствуют. Сказывается ограничение частотной характеристики акселерографов.

Рисунок 4.37 - Форма спектра реакции в скоростях

В короткопериодной части спектра имеется точка перегиба (абсцисса ее составляет  $\approx T_0(PGV) / T_0(PGA) \approx 2.7$ ), 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.

Согласно рисунку 4.37, 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%.

#### 4.6 Выводы

1. Разработан 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 скорости зависит от магнитуды и расстояния, а в ближней определяется в основном 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.

## **Глава 5 ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМИЧЕСКОГО ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА**

Разработанные в предыдущих главах корреляционные соотношения, связывающие параметры сейсмических колебаний в ускорениях и скоростях с различными параметрами очага и среды, позволяют предложить метод прогноза параметров сильных движений грунта, основанный на анализе имеющегося эмпирического материала.

### **5.1 Эмпирический метод прогнозирования параметров сейсмического движения грунта**

Первый этап работы - выделение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), опасных для рассматриваемого объекта. Для каждой из таких зон необходимо определить расстояние, максимально возможную магнитуду, глубину и механизм очага.

Второй этап работы - подбор и обработка эмпирических данных. Записи сильных сейсмических событий из выделенных зон ВОЗ, полученные в ближней зоне землетрясений, являются наиболее информативным материалом для выявления локальных особенностей сейсмических колебаний. Отбираются только те сейсмические записи, для которых соотношение сигнал – помеха не менее 3. В результате статистической обработки такого материала определяются средние значения главных параметров сейсмического движения грунта в районе исследований - преобладающий период колебаний, продолжительность, ширину импульса, коэффициент динамического усиления - и соответствующие стандартные отклонения. На этом же этапе разрабатывается кривая затухания амплитуд колебаний.

Если же эмпирических данных недостаточно или они отсутствуют, то, используя результаты первого этапа - установленные параметры выделенных зон ВОЗ, на основании полученных в главах 3 и 4 соотношений рассчитываются прогнозные значения ожидаемых параметров сейсмических колебаний для

интересующих уровней сейсмической опасности. Значения пиковых амплитуд определяется по представленным там же кривым затухания.

Заключительный этап - построение локального спектра реакции, методика построения которого будет описана далее.

При расчетах средние оценки параметров колебаний заменяются диапазонами значений, соответствующими стандартным отклонениям этих величин.

Напомним, как было показано ранее [Махдавин и др., 2005; Эртелева и др., 2011 и др.], использование местных данных позволяет снизить стандартное отклонение.

## 5.2 Построение спектров реакции по эмпирическим данным

Наиболее часто используются два метода расчетов поведения зданий и инженерных сооружений на сейсмические воздействия: спектральный и динамический. В первом случае сейсмические воздействия задаются в виде спектров реакции (спектров ответа), во втором – в виде акселерограмм. При применении первого метода спектр считается независимым от параметров очага и расстояния, учитываются только грунтовые условия. Осреднение спектральных уровней ведется на фиксированных частотах. Поэтому обобщенные спектры всегда ниже по уровню реально наблюдаемых.

Предлагаемая методика построения среднестатистического спектра производится с учетом правил теории размерностей и подобия. Поскольку безразмерные величины не зависят от масштаба явления, сначала оценивается форма спектра. Для этого реальные спектры нормируются как по уровню, так и по преобладающему периоду. Полученные таким образом нормированные спектры в координатах  $PGA/PGA_{\max}$  и  $T/T_0$  не зависят от магнитуды, сохраняя форму спектра. Все нормированные спектры осредняются, в результате чего получаем средний спектр, средняя логарифмическая ширина которого сопровождается оценкой стандартного отклонения. Переход от среднего нормированного спектра

к ожидаемому производится путем оценки ожидаемых преобладающего периода и уровня спектра (включая значение коэффициента динамического усиления) в зависимости от магнитуды, типа подвижки в очаге, расстояния и грунтовых условий. При наличии записей сильных движений, полученных в районе исследований, помимо основных параметров очагов, естественно учитываются и другие, неизвестные факторы, влияющие на характеристики сейсмических колебаний, такие, как, например, направленность излучения, мощность земной коры, тип горных пород в очаговой области, “залеченность” существующего разлома и другие. При этом стандартное отклонение оценок параметров сейсмического воздействия значительно снижается и определяется лишь естественным разнообразием местных землетрясений.

Описанная методика применима для построения спектров скоростей и смещений.

В практике современного проектирования и строительства, как правило, используются спектры ускорений. Но при больших периодах ускорения перестают быть хорошей мерой сейсмического воздействия. Особенно важно учитывать этот факт при возведении сверхвысотных зданий, длиннопролетных мостов и других сооружений с большими собственными периодами колебаний. Для них опасность могут представлять не только близкие землетрясения, но и удаленные сейсмические события больших магнитуд. Колебания, генерируемые такими землетрясениями на больших расстояниях, имеют повышенные периоды (а, значит, и повышенные скорости колебаний), большие продолжительности, увеличенные коэффициенты динамического усиления. Если собственные частоты колебаний строительного объекта близки к частотам колебаний грунта, то такие сейсмические воздействия могут быть опасными для сооружения [Алказ и др., 2007, Уломов, 2009; Аптикаев и др., 2011].

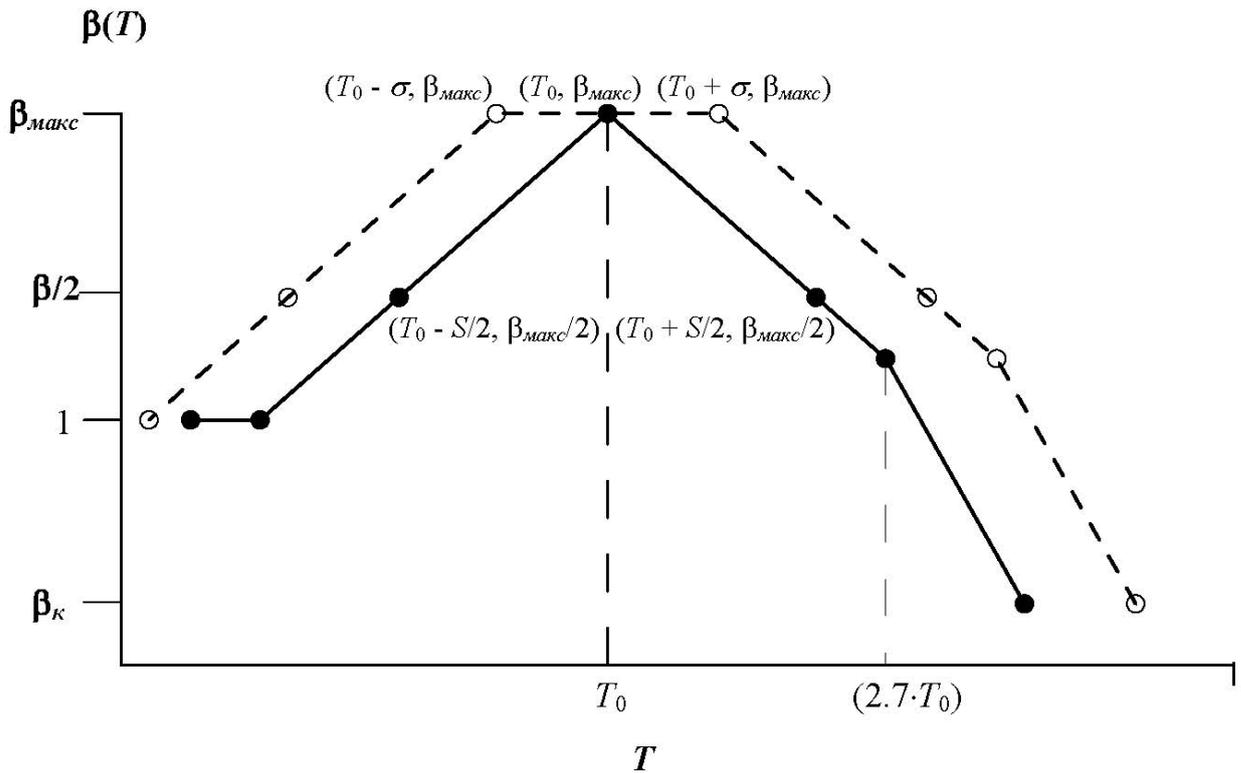
### 5.2.1 Локальные спектры ускорений

Основой методики построения ожидаемого локального спектра реакции 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  $S$  [Аптикаев, Михайлова, 1985; Аптикаев, Эртелева, 2001; Аптикаев, Эртелева, 2008а; Aptikaev, Erteleva, 2008; Эртелева и др., 2011]. 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 низкочастотной ветви спектра имеется точка излома, определяемая как  $2.7 \cdot T_0$  и соответствующая преобладающему периоду скорости.

Ожидаемый уровень ускорения грунта и преобладающий период колебаний можно оценить по формулам, приведенным в главе 3.

Построение спектра реакции ускорения начинается с точки, соответствующей спектральному максимуму и имеющей координаты  $(T_0, \beta_{\max})$  (рисунок 5.1). 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 полумаксима ( $\beta_{\max}/2$ ). От вершины спектра через указанные точки проводим отрезки до предварительно заданного уровня (от спектрального максимума) ( $\beta_k$ ). На низкочастотном склоне полученного таким образом спектра строим точку излома, имеющую абсциссу  $(2.7 \cdot T_0)$ , после которой уровень спектра определяется квадратом текущего периода.

Чтобы учесть неопределенность в положении преобладающего периода, рассматриваем интервал периодов, в который с заданной вероятностью попадет преобладающий период. Другими словами, вместо ожидаемого с вероятностью



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

Рисунок 5.1 – Схема построения спектра реакции в ускорениях (в двойном логарифмическом масштабе)

$p = 0.5$  преобладающего периода задается 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.

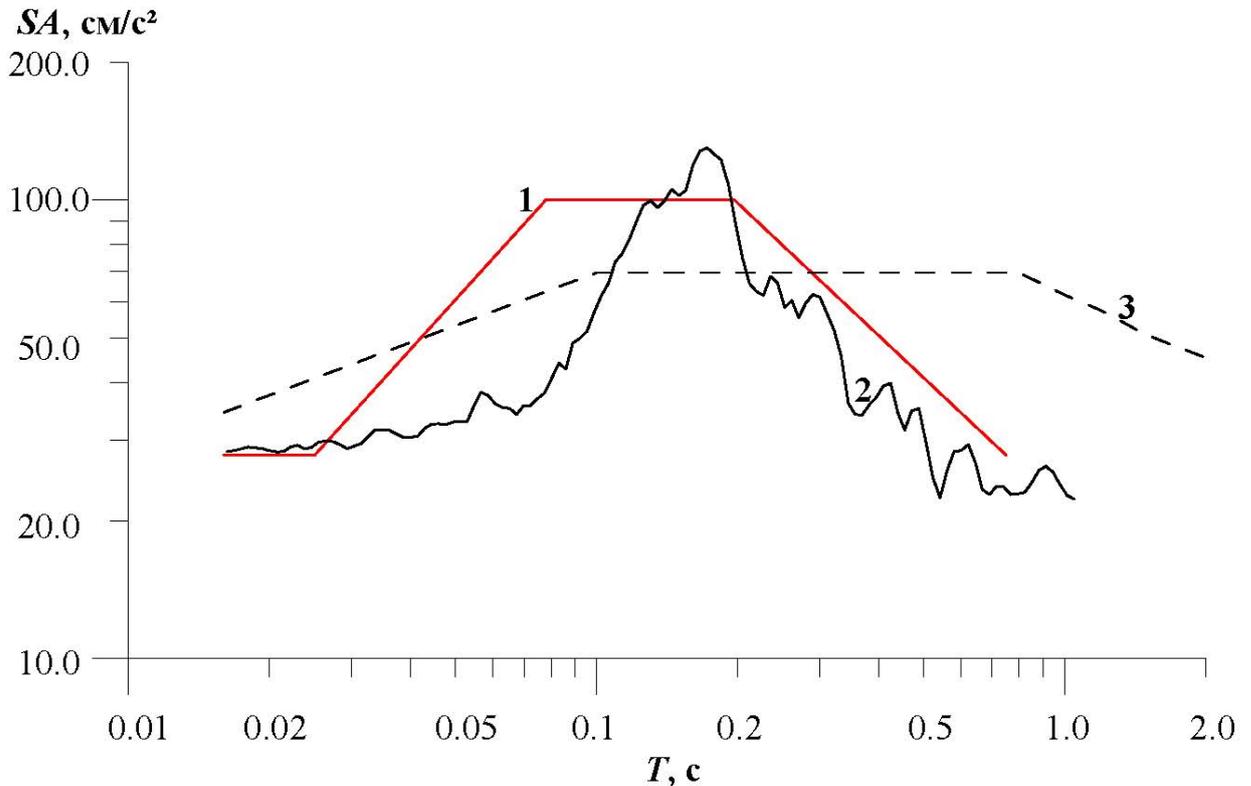
Стандартное отклонение для уровня колебаний не вводится, поскольку магнитудный потенциал зоны ВОЗ уже задается в качестве максимально возможного (для выбранного периода повторяемости).

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 одинаковыми 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 приведем 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. Запись была получена эпицентральной экспедицией Объединенного института физики Земли РАН [Арефьев и др., 1995; Эртелева, 1998]. Входными данными являются: магнитуда  $M_S=5.0$ ,  $R = 15$  км, тип подвижки в очаге – взбросодвиг. Используя результаты главы 3 (см. подраздел 3.4.1) и учитывая неопределенность в положении  $T_0$ , получаем, что ожидаемый максимум спектра реакции находится в диапазоне 0.08 – 0.20 с. Величину логарифмической ширины спектра на уровне 0.5 от максимального значения примем равной среднемировому значению 0.6 ед. десятичного логарифма. В качестве значения ускорения грунта  $PGA$  при построении спектра используем реально зарегистрированное ускорение  $27.8$  см/с<sup>2</sup>. Значение коэффициента  $\beta$  примем равным среднемировому значению 3.6. Грунты в месте расположения сейсмостанции относились к III категории. При расчете спектра резонансные

свойства грунта не учитывались, поскольку микрорайонирование в пункте не проводилось. На основании имеющихся данных получаем расчетный спектр, показанный на рисунке 5.2.



1 – расчетный спектр без учета резонансных свойств грунта;

2 – спектр реальной акселерограммы;

3 – стандартный спектр по СП 14.13330.2018

Рисунок 5.2 - Пример построения ожидаемого спектра реакции для афтершока (13.06.95 г.,  $t_0 = 21^ч - 35^{мин}$ ) Нефтегорского землетрясения 1995 г. на станции Нефтегорск, демпфирование 5%

На рисунке также показан реальный спектр ускорения и стандартный спектр из СП 14.13330.2018. Как видим, стандартный спектр слишком консервативен по частотному составу и явно занижен по уровню. Спектр, построенный по предлагаемой методике, хорошо согласуется со спектром реальной акселерограммы, несмотря на то, что оценка входных параметров

проводилась без учета результатов обработки всех имеющихся записей афтершоков. Использование нескольких местных записей сильных движений позволило бы еще более сузить доверительный интервал.

Описанная методика построения локального спектра ускорения разработана для прогноза сейсмических воздействий в ближней и дальней зонах землетрясений. Проблема оценки воздействий от удаленных землетрясений выходит за круг вопросов, рассматриваемых в диссертации. Тем не менее, не вдаваясь в подробности расчетов, отметим, что предложенная методика применима и в этом случае. Результаты автора изложены в работе [Эртелева, 2013].

### 5.2.2 Локальные спектры скоростей

Аналогично предыдущему расчет среднего спектра реакции по скоростям проводится с использованием средних эмпирических оценок параметров спектров [Эртелева, 2015]. 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 высокочастотной и низкочастотной полуширине спектра по разные стороны от преобладающей частоты.

Напомним, что на основании имеющегося в районе исследований эмпирического материала устанавливается локальный закон затухания амплитуд скоростей, и оцениваются основные характеристики спектров скоростей (см. раздел 4.5 главы 4):

- ожидаемый период колебаний  $T_0$  с соответствующим стандартным отклонением  $\pm \sigma(T_0)$  по зависимостям его от магнитуды и гипоцентрального расстояния  $T_0 = f(M, R)$ ;
- локальный коэффициент динамического усиления  $\beta$ ;

– локальная логарифмическая ширина спектра  $S$ , а также высокочастотная и низкочастотная полуширины спектра  $S_1$  и  $S_2$  (желательно на нескольких уровнях, обязательно включая уровень  $0.5S$  от максимального).

Если же для района исследования эмпирически такие зависимости (какую-либо из них или все) установить нельзя, то, согласно эмпирическому методу прогнозирования параметров сейсмического движения грунта, можно использовать среднемировые соотношения, полученные в главе 4. Кстати, наши оценки затухания амплитуд в различных регионах мира показали, что влияние местных условий 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, установленную в главе 4:

– 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 высокочастотная полуширина спектра составляет 0.32 ед. десятичного логарифма, а низкочастотная - 0.62 ед. десятичного логарифма;

– на уровне  $\beta = 1$  проходит асимптотическая линия, соответствующая уровню входного сигнала спектра  $PGV$ .

Построение спектра скорости 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 полумаксимумы  $(\beta_{\max}/2)$ . 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  $(T_0 + 3S_2, 1)$ .

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 (рисунок 5.3).

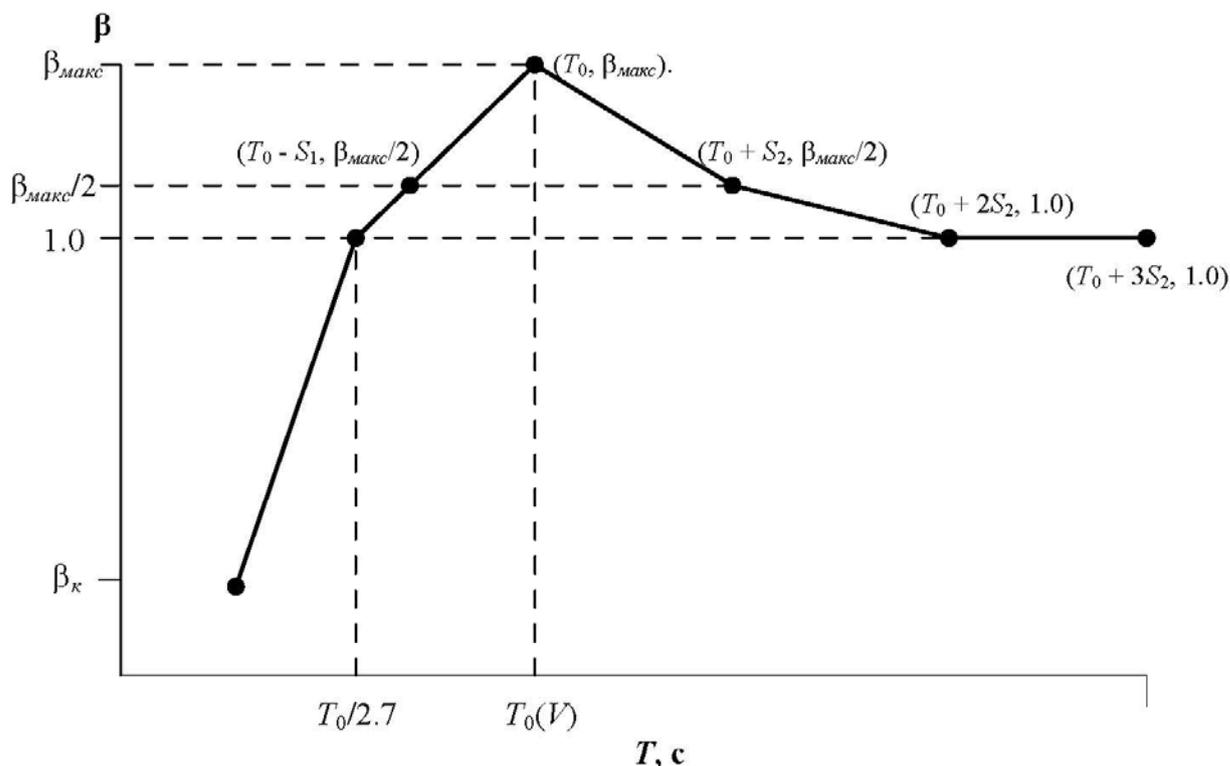
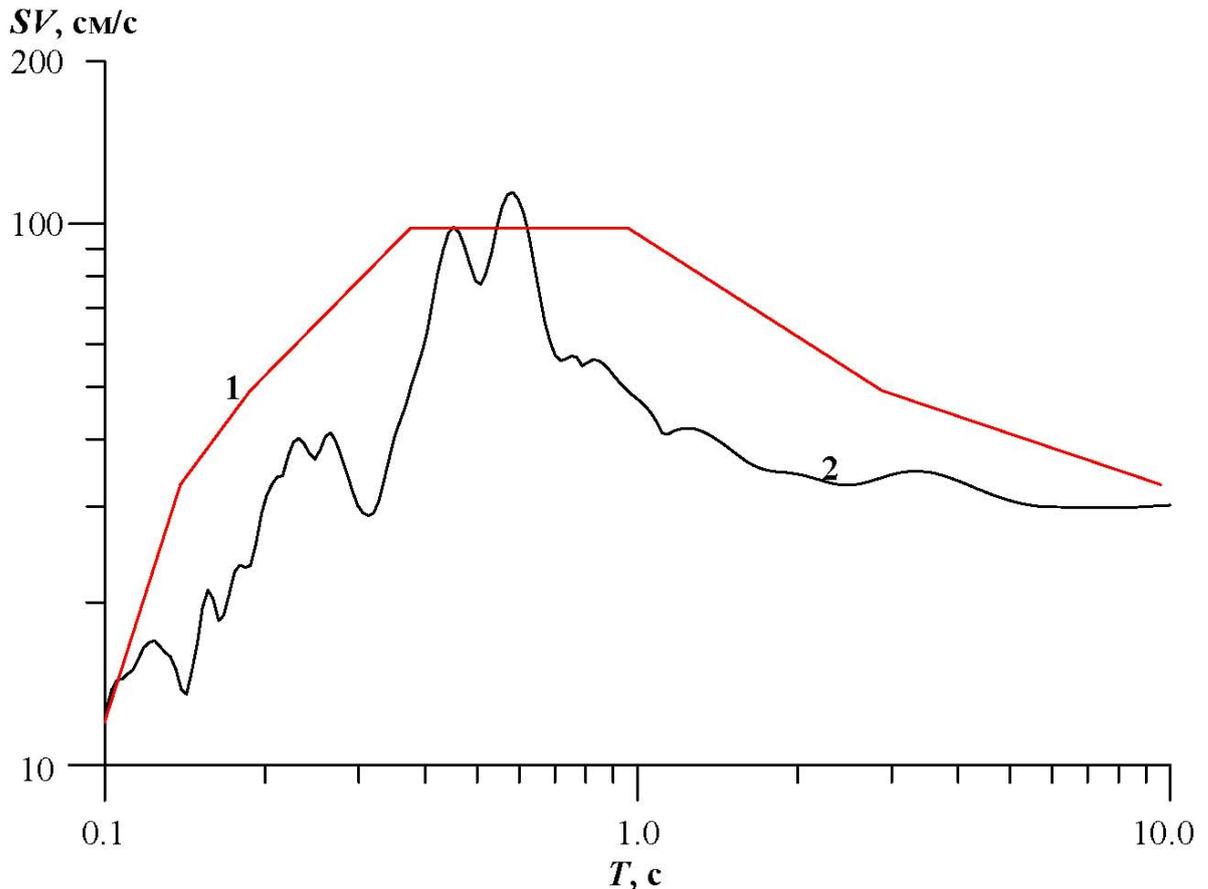


Рисунок 5.3 – Схема построения спектра реакции в скоростях

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. Тогда склоны спектра будут задаваться от концов интервала, в котором ожидается преобладающий период, а ширина спектра расширится за счет доверительных интервалов.

Используя результаты главы 4, спектры реакции для двух горизонтальных компонент и вертикальной компоненты могут быть построены отдельно. Аналогичные вычисления могут быть проведены при необходимости для расчетов спектров реакции с различным демпфированием.

Приведем пример построения расчетного (67% доверительный интервал для частотного состава) спектра реакции скорости для землетрясения Лонг Валли, 27.05.1980 г. ( $t_0 = 14^h - 50^{мин}$ ), на станции Лонг Валли Дам. Как и в случае спектра ускорений, входными параметрами являются значение магнитуды события  $M_s = 6.0$  и кратчайшее расстояние до разлома  $R = 1$  км, механизм очага – сдвиг. По формулам, приведенным в главе 4, оцениваем преобладающий период скорости  $T_0(PGV)$ , пиковую скорость  $PGV$ . Значение коэффициента  $\beta$  примем равным среднемировому значению 2.8. На основании этих данных получаем расчетный спектр, показанный на рисунке 5.4.



1 – расчетный спектр без учета резонансных свойств грунта;

2 – реальный спектр

Рисунок 5.4 - Пример построения расчетного спектра реакции в скоростях для землетрясения (27.05.1980 г.,  $t_0 = 14^{\text{ч}}-50^{\text{мин}}$ ) на станции Лонг Валли Дам, демпфирование 5%

На этом же рисунке показан реальный спектр скорости рассматриваемого события. Как видим, спектр, построенный по предлагаемой методике, хорошо согласуется с реальным.

### 5.3 Банк региональных синтетических акселерограмм

Конечными результатами оценки количественных параметров сейсмических движений грунта, которые могут быть использованы непосредственно в инженерных расчетах, являются проектный спектр реакции, продолжительность колебаний и соответствующая акселерограмма или набор акселерограмм,

максимально близких к ожидаемым [Эртелева, Аптикаев, 2016]. Естественно, что инженерам-проектировщикам желательно иметь набор “спектр и акселерограмма с учетом продолжительности” постоянно под рукой. Или, иными словами, всегда иметь возможность подобрать его из базы сейсмических воздействий, реализация которых наиболее вероятна на площадке строительства. Поэтому постоянно обсуждается вопрос о необходимости создания банка региональных акселерограмм – хранилища, из которого по тем или иным правилам можно подобрать материалы для динамических расчетов аналогично тому, как по картам общего сейсмического районирования (ОСР), являющимся неотъемлемой частью строительных норм СП 14.13330.2018, можно определить интенсивность в любом населенном пункте нашей страны. Рассмотрим вопрос о возможности создания такого банка; задачи, возникающие при этом, и пути их разрешения.

### **5.3.1 Региональные особенности основных параметров сильных движений грунта**

Как видно из формул, приведенных в главах 2 – 4, прогнозные величины основных параметров сильного движения грунта - преобладающего периода, продолжительности колебаний и пикового ускорения - определяются магнитудой события, механизмом очага, расстоянием объекта до очага, а также локальными грунтовыми условиями. Не стоит забывать и о резонансных свойствах грунтов, учет которых в локальном спектре производится при работах по сейсмическому микрорайонированию (СМР). Следовательно, и региональные акселерограммы, которые должны являться результатом исследований по оценке сейсмических воздействий, определяются теми же самыми факторами, связанными с очагами землетрясений и средой распространения сейсмических волн.

Каждый из перечисленных параметров имеет несколько градаций [Эртелева, Аптикаев, 2016]. Для каждой зоны ВОЗ, эти параметры будут различаться. Если же таких зон несколько придется иметь дело с совокупностью *m* различных воздействий, включая рассеянную сейсмичность. В реальности для

малых магнитуд и расстояний при равных интенсивностях уровень  $PGA$  имеет более высокие значения, а при больших магнитудах и расстояниях – наоборот. По записям местных землетрясений могут быть учтены и другие региональные факторы. Вариации параметров сейсмических колебаний даже в пределах одного региона могут быть значительными (см., например, [Nersesov, Aptikaev, 1981; Антонова, Аптикаев, 1991; Аптикаев, 1992; Махдавиан и др., 2005]).

Весьма важному параметру – расстоянию – в регионе будет соответствовать множество  $n$  различных акселерограмм, где  $n$  – количество диапазонов расстояний, на которых значимо изменяется уровень ускорений.

Минимальное количество грунтовых условий согласно нормативным документам в нашей стране четыре [СП14.13330.2018], но намечается тенденция к их увеличению, как в зарубежных нормах. Обозначим оптимальное количество градаций при СМР –  $l$ .

Как результат получаем, что общее количество акселерограмм, характерных для региона, будет определяться произведением  $m \times n \times l$ .

Рассмотрим простейший случай, когда учитываются воздействия от одной зоны ВОЗ и рассеянной сейсмичности. В этом случае  $m = 2$ .

Инженерный диапазон интенсивностей - от 6 до 9 баллов. Каждой интенсивности соответствует свой интервал расстояний. Тогда количество диапазонов расстояний составит  $n = 4$ .

Количество градаций грунтов в результате СМР примем  $l = 4$ .

В результате получаем, что для отдельной площадки изыскания необходим набор из 32 акселерограмм.

В другом месте будут зоны ВОЗ с другими магнитудами, другими механизмами очага, другими расстояниями, значит, будет необходимо создать другие 32 акселерограммы. Поскольку точность оценок сейсмической интенсивности не хуже 0.5 балла, количество акселерограмм придется увеличить еще вдвое. Иными словами, для каждой площадки необходимо провести ДСР. Но при ДСР не перебираются всевозможные варианты, а оцениваются сейсмические воздействия для имеющихся условий.

### 5.3.2 Подбор синтетических акселерограмм по параметрам сейсмических воздействий

Учет региональных особенностей сейсмических воздействий – это взгляд на проблему создания банка региональных акселерограмм с точки зрения разнообразия параметров очага и среды [Эртелева, Аптикаев, 2016]..

Рассмотрим эту же задачу с позиций разнообразия параметров самих сейсмических воздействий. Как следует из выше сказанного, акселерограмма генерируется под построенный спектр с учетом продолжительности (с последующим нормированием уровня  $PGA$  к ожидаемому значению). Сам же спектр можно построить, определив преобладающий период колебаний  $T_0$ , логарифмическую ширину спектра  $S$  и коэффициент динамического усиления  $\beta$ . Последние две величины можно считать фиксированными и использовать их среднемировые значения, либо определить региональные при наличии достаточного количества записей сильных движений в исследуемом регионе. Кроме того, значение  $\beta$  можно принять исходя из каких-либо дополнительных соображений, например, руководствуясь строительными нормами.

Тогда сам 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 продолжительности колебаний  $\tau$ . При этом весь диапазон преобладающих периодов можно разбить на интервалы, соответствующие точности определения величины  $T_0$ , например,  $0.1 \div 0.25$  с,  $0.25 \div 0.62$  с,  $0.62 \div 1.6$  с. Для преобладающих периодов получаем 3 градации.

Если применить шаг градации, равный изменению продолжительности в четыре раза (плюс - минус стандартное отклонение)  $0.25 \div 1.0$  с,  $1.0 \div 4.0$  с,  $4.0 - 16$  с,  $16 - 64$  с, получим 4 дополнительные градации.

Если приращение амплитуды оценивать только по категориям грунта, получим еще 4 градации.

Итого необходимо рассчитать минимум 48 акселерограмм для каждой зоны ВОЗ. Разумеется, такая градация упрощает задание воздействий, но заметно увеличивает погрешность оценок. Кроме того, эта методика создания банка не учитывает резонансные явления, наличие последних искажает форму спектра.

При учете типа подвижки в очаге другими региональными особенностями можно пренебречь. Другими словами, речь пойдет не о региональных банках акселерограмм, а об общем банке. Поиск требуемой акселерограммы производится независимо от того, какими факторами обусловлены полученные оценки преобладающего периода и продолжительности колебаний. 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 для пользователя без потери точности прогнозных оценок воздействий, т.е. с учетом, прежде всего, локальных и региональных особенностей.

Учет региональных особенностей становится возможным лишь при непосредственном проведении полевых работ на площадке и в окрестностях площадки строительства: сеймотектонических, сейсмологических и т.д. – работ по детальному сейсмическому районированию (ДСР). При проведении ДСР устанавливается детализированная сеймотектоническая модель региона (модель зон ВОЗ) с определением параметров зон ВОЗ, необходимых для расчета сейсмических воздействий в исследуемом регионе, см., например, [Детальное..., 1980]. Более серьезной проблемой является учет грунтовых условий. Для каждой площадки с учетом результатов СМР оцениваются ожидаемые преобладающий период и продолжительность колебаний.

Как правило, оценка сейсмических воздействий, в том числе создание синтетической акселерограммы, производится для конкретной строительной площадки, а не для всего региона. Примером таких работ может служить детальное сейсмическое районирование (ДСР), выполненное Институтом физики Земли РАН для г. Калининграда [Комплексные..., 2008].

Разумеется, важнейшим условием решения проблемы остается получение и накопление записей сильных движений при местных землетрясениях, составляющих основу для прогноза параметров сильных движений грунта.

#### **5.4 Выводы**

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.

Уточнены уравнения 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 амплитуд пиковых 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 (найжены средние значения и соответствующие стандартные отклонения, их внутренние взаимосвязи).

Несмотря на то, что изучение нелинейных явлений, возникающих в эпицентральных областях землетрясений, 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.

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

Рассмотрены проблема 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 амплитуды

пиковых 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 результаты, приведенные в диссертационной работе, 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 первоочередную задачу вполне исполнимой. 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 и 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 содействовать более успешному разрешению 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

Айзенберг Я.М. Модель сейсмического воздействия для расчета сооружений при неполной сейсмологической информации // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности [Текст] : [Сборник статей] / Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству при Президиуме АН СССР ; [Отв. ред. акад. А. Г. Назаров, д-р физ.-мат. наук Н. В. Шебалин]. - М.: Наука, 1975. - С. 170 - 178.

Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования / А.С.Алешин. - М.: Научный мир, 2017. - 302 с.

Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов / А.С.Алешин. - М.: Светоч-Плюс, 2010. - 304 с.

Алказ В.Г., Капустян Н.К., Марченков А.Ю. К оценке проектируемого сейсмического воздействия на высотные здания в Москве // Buletinul Institutului de Geologie si Seismologie al ASM. - 2007. - № 1. - С. 5 – 9.

Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф. Опыт картирования сейсмоактивной территории по динамическим параметрам сейсмических волн // Землетрясения и процессы их подготовки: Сб. науч. тр. / АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта, Комплекс. сейсмол. экспедиция; [Отв. ред. В. Н. Страхов]. - М.: Наука, 1991. - С. 103 - 107.

Аптикаев Ф.Ф. Замечания об инструментальной шкале // Бюлл. по инж. сейсмологии. - 1972. - № 7. - С. 31 – 35.

Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности [Текст] / Ф. Ф. Аптикаев; Российская акад. наук, Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. -. Москва: Наука и образование, 2012. - 175 с.

Аптикаев Ф.Ф. О влиянии грунтовых условий на сейсмический эффект в Алма-Ате по данным взрывов в Медео в 1965 - 1967 гг. // Бюлл. по инж. сейсмологии. - 1973. - № 8. - С. 55 - 62.

Аптикаев Ф.Ф. Оценки параметров сейсмических колебаний при сейсмическом районировании // Экспериментальная сейсмология [Текст] : Сборник статей / [Отв. ред. акад. М. А. Садовский]; АН СССР. Ин-т физиологии Земли им. О. Ю. Шмидта. - М.: Наука, 1983. - С. 173 – 180.

Аптикаев Ф.Ф. Параметризация записей сейсмических колебаний // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1981. - Вып. 21. - С. 3 - 8.

Аптикаев Ф.Ф. Параметры сейсмических колебаний, возбужденных взрывом // Труды ИФЗ АН СССР. - 1964. - № 32 (199). - С. 49 - 62.

Аптикаев Ф.Ф. Распространение сейсмических волн в поглощающей среде // Геофизика и математика. Материалы 1-й Всероссийской конференции (Москва, 22 – 26 ноября, 1999). - М.: ОИФЗ РАН, 1999. - С. 8 - 9.

Аптикаев Ф.Ф. Сейсмические колебания при землетрясениях и взрывах [Текст] / АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. - М.: Наука, 1969. - 113 с.

Аптикаев Ф.Ф. Стоячие волны в эпицентральной области // Сейсмические волновые поля [Текст]: [сборник статей] / Российская акад. наук ; [Отв. ред. А. Я. Сидорин]. - М.: Наука, 1992. - С. 101 - 103.

Аптикаев Ф.Ф. Учет длительности колебаний при инструментальной оценке сейсмической интенсивности // Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности [Текст]: [Сборник статей] / Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву при Президиуме АН СССР ; [Отв. ред. акад. А. Г. Назаров д-р физ.-мат. наук Н. В. Шебалин]. - М.: Наука, 1975. - С. 234 - 239.

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.

Аптикаев Ф.Ф., Гладышева Г.С., Итон Дж., Нерсесов И.Л. Связь параметров сейсмических колебаний при сильных и слабых землетрясениях //

Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений [Текст] / Ред. коллегия: акад. М. А. Садовский (отв. ред.) и др.; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. АН СССР. Агентство по охране окружающей среды США. Геол. служба США. - Душанбе: Дониш, 1979а. - Том 1, книга 2. - С. 129 - 138.

Аптикаев Ф.Ф., Горбунова И.В., Докучаев М.М. и др. Результаты научных наблюдений при взрыве в Медео // Вестник АН Каз. ССР. - 1967. - № 5. - С. 30 – 40

Аптикаев Ф.Ф., Ибрагимов Р.Н., Кнауф В.И. и др. Методические рекомендации по детальному сейсмическому районированию // Вопр. инж. сейсмол. - 1986. - Вып. 27. - С. 184 - 211.

Аптикаев Ф.Ф., Итон Дж., Николаев А.В., Седова Е.Н. Корреляция параметров сейсмических колебаний при местных и удаленных землетрясениях // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений [Текст] / Ред. коллегия: акад. М. А. Садовский (отв. ред.) и др.; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. АН СССР. Агентство по охране окружающей среды США. Геол. служба США. - Душанбе: Дониш, 1979б. - Том 2, книга 2. - С. 121 - 128.

Аптикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага при прогнозе параметров сильных движений // Доклады Академии наук. - 1979. - Т. 247, № 4. - С. 822 - 825.

Аптикаев Ф.Ф., Маттиссен Р., Негматуллаев С.Х. и др. Прогноз сейсмического движения грунта // Сборник советско - американских работ по прогнозу землетрясений [Текст] / Ред. коллегия: акад. М. А. Садовский (отв. ред.) и др.; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. АН СССР. Агентство по охране окружающей среды США. Геол. служба США. - Душанбе: Дониш, 1976. - Том 1, книга 2. - С. 188 - 196.

Аптикаев Ф.Ф., Михайлова Н.Н. Форма спектра реакции в ускорениях // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1985. - Вып. 26. - С. 142 - 144.

Аптикаев Ф.Ф., Нерсесов И.Л. Методика детального сейсмического районирования в количественных характеристиках сейсмических колебаний // Детальное сейсмическое районирование [Текст]: [сборник статей] / АН СССР, Межведомственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству ; [отв. ред. И. Е. Губин]. - М.: Наука, 1980. - С. 96 - 100.

Аптикаев Ф.Ф., Роджан К., Фролова Н.И. Форма огибающей амплитуд ускорений на записях сильных движений // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений [Текст] / Ред. коллегия: акад. М. А. Садовский (отв. ред.) и др.]; Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. АН СССР. Агентство по охране окружающей среды США. Геол. служба США. - Душанбе ; Москва : Дониш. 1979в. - Т. 2, книга. 2. - С. 139 - 147.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. “Большая” сейсмология вводит инженеров в заблуждение // Инженерные изыскания. - 2014. - № 2/2014. - С. 42 – 46.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных записей // Физика Земли. - 2002. - № 7. - С. 39 – 45.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Задание спектров и соответствующих синтетических акселерограмм // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2005б. - № 5. - С. 67 – 71.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Метод задания регионального спектра реакции для строительного проектирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2001. - №4. - С. 4 - 7.

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.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Параметры спектров реакции // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2008а. - № 5. - С. 23 – 25.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Проектные и реальные спектры реакции: проблема точности задания сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2005а. - № 1. - С. 43 – 45.

Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Соотношение амплитуд различных компонент ускорений грунта в эпицентральной зоне // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2008б. - Вып. 35, №1. - С. 55 – 62.

Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования / С.С.Арефьев. - М.: Академкнига, 2003. - 376 с.

Арефьев С.С., Плетнев К.Г., Татевосян Р.Э. и др. Предварительные результаты эпицентральных наблюдений Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. // Инф.-анал.бюл. Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: Нефтегорское землетрясение 27(28).05.1995 г. - 1995.- Специальный выпуск. - С. 36 - 47.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Методология построения нового комплекса карт общего сейсмического районирования территории Узбекистана ОСР – 2017 // Геориск. - 2018. - Т. XII, № 2. - С. 4 – 24.

Артиков Т.У., Ибрагимов Р.С., Кучкаров К.И., Ибрагимова Т.Л., Мирзаев М.А. Сейсмическая опасность территории Узбекистана в амплитудах скоростей колебаний грунта при землетрясениях // Доклады АН РУз. - 2016. - № 4. - С. 61 – 64.

Барштейн М.Ф. Приложение вероятностных методов к расчету сооружений на сейсмические воздействия // Строительная механика и расчет сооружений. - 1960. - № 2. - С. 6 – 14.

Бондаренко В.И., Курзанов А.М., Римшин В.И. Механизм сейсмических разрушений зданий // Вестник Российской Академии Наук. - 2000. - Т. 70, № 11. - С. 1005 - 1009.

Бюллетени международного сейсмологического центра. - Newbury, 1961 - 1996 гг.

Вознесенский Е.А. Землетрясения и динамика грунтов // Соровский образовательный журнал. - 1998. - № 2. - С. 101 - 108.

Газлийские землетрясения 1976 г. инженерный анализ последствий. - М.: Наука, 1982. - 196 с.

Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. / Под ред. Г. А. Мавлянова. - Ташкент: Фан, 1986. - 368 с.

Гарагозов Дж. Сильные движения при землетрясениях Туркменистана и проблемы оценки сейсмической опасности // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Ашхабадского землетрясения (Ашхабад, октябрь 1998). - Ашхабад: Дамана, 1999. - С. 79 - 85.

ГОСТ 26883-86 (СТ СЭВ 5127-85). Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. - М.: Сандартинформ, 2008. – 10 с.

ГОСТ Р 57546-2017 Национальный стандарт Российской Федерации “Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности” - М.: Сандартинформ, 2017. - 28 с.

Грайзер В.М. "Истинное" движение почвы в эпицентральной зоне / В.М. Грайзер. - М.: ИФЗ, 1984. - 198 с.

Грайзер В.М., Эртелева О.О. Смещения от дислокационного разрыва в полупространстве // Физика Земли. - 1991. - № 5. - С. 71 - 78.

Гриб Г.В., Пазынич А.Ю., Гриб Н.Н., Петров Е.Е. Зависимость сейсмического действия взрыва в массиве горных пород от технологических

условий ведения буровзрывных работ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. - Т. 14, № 1 (8). - С. 2112 – 2117.

Григорян В.Г., Карапетян Дж.К. Об одном методе оценки кривой динамичности Общая и прикладная механика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. -№ 4 (2). - С. 112 – 113.

Гусев А.А. Модель очага землетрясения со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. - 1988. - № 1. - С. 41 - 55.

Давиденков Н.И. О рассеянии энергии при вибрациях // Журнал технической физики. - 1938. - Т. 8, №6. - С. 15 - 21.

Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Разрушительные последствия. Инженерная Сейсмология. Вопросы сейсмостойкого строительства / Отв. ред. Х.И.Амирханов. - М: Наука, 1981. - 260 с.

Детальное сейсмическое районирование. [Текст]: [сборник статей] / АН СССР, Междугосударственный совет по сейсмологии и сейсмостойкому строительству; [отв. ред. И. Е. Губин]. - М.: Наука, 1980. - 175 с.

Долгая А.А., Индейкин А.В. Статистический анализ интенсивности по Ариасу и скорости для реальных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2002. - № 2. - С. 32 - 33.

Заалишвили В.Б. Физические основы сейсмического микрорайонирования / В.Б.Заалишвили. - М.: ОИФЗ РАН, 2000. - 367 с.

Зайнутдинова Д.Б. Прогноз сейсмических воздействий на основании инструментальных сейсмологических наблюдений: На примере Узбекистана: диссертация ... кандидата геолого-минералогических наук : 01.04.12. - Ташкент, 1988. - 140 с.

Землетрясения в СССР в... году [Текст]: сборник научных трудов / Академия наук СССР, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта; [редкол.: Н.В. Кондорская (отв. ред.) [и др.]. - М.: Наука, 1964 - 1993.

Землетрясения России ... [Текст]: [сборник] / Российская акад. наук, Геофизическая служба РАН; [редкол.: И. П. Габсатарова (отв. ред.) и др.]. - Обнинск: ГС РАН, 2016 - 2018.

Землетрясения Северной Евразии ... [Текст]: сборник научных трудов / Российская акад. наук, Геофизическая служба. - М.: Российская акад. наук; Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2000 – 2015.

Извайлов С.В., Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Применение методики детального сейсмического районирования при проектировании мостов // Дороги. Инновации в строительстве. - 2017. - № 64/сентябрь. - С. 36 – 38.

Калинина А.В., Аммосов С.М., Быкова В.В., Татевосян Р.Э. О применимости стандартного спектра реакции для оценки ожидаемых сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2017. - Т. 44, № 2. - С. 61 – 73. - DOI: 10.21455/VIS2017.2-4

Карапетян Дж.К. Сопоставительный анализ расчетных кривых коэффициента динамичности  $\beta$  ( $T$ ,  $n$ ), полученных различными методами // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2012. - Т. 39, № 3. - С. 33 – 40.

Комплексные сейсмологические и сеймотектонические исследования для оценки сейсмической опасности территории г.Калининграда: отчет о НИР. - М.: ИФЗ РАН, 2008. - 338 с.

Коновалов А.В., Манайчев К.А., Степнов А.А., Гаврилов А.В. Региональная модель затухания сильных движений грунта для о.Сахалин // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2018. - Т. 45, № 1. - С. 19 – 30. - DOI: 10.21455/VIS2018.1-2

Кудрявцева Г.А., Роман А.А., Шебалин Н.В. Землетрясения в СССР. Записи ощутимых землетрясений 1965-1967 гг.: Альбом-прил. к ежегоднику "Землетрясения в СССР" / Г. А. Кудрявцева, А. А. Роман, Н. В. Шебалин; АН СССР, Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. - М.: Наука, 1973. - 44 с.

Курбацкий Е.Н., Баев Л.В. Спектры максимальных реакций (откликов) конструкций на сейсмические и техногенные динамические воздействия // Труды IV научно-практического семинара “Надежность и безопасность зданий и сооружений при сейсмических воздействиях”. (Москва, 2011). - МГСУ (МИСИ), 2011. - С. 4 – 35.

Левшин А.Л., Грудева Н.П. Некоторые вопросы теории магнитуд // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений / [Текст]: Сборник статей : В 2 т. / Ред. коллегия: Н. В. Кондорская (докт. физ.-мат. наук) [и др.] ; АН СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву при Президиуме АН СССР. Том I. - М.: ГУГМС, 1974. - С. 172 - 180.

Ли А.Н. Методика использования данных станций регионального типа для прогноза сейсмических воздействий: диссертация ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.12. - Алма-Ата: ИС АН Каз. ССР, 1990. - 220 с.

Махдавиан А., Аптикаев Ф.Ф., Эртелева О.О. Параметры сильных движений грунта в сейсмически активных зонах Ирана // Физика Земли. 2005. - Т. 41, № 2. - С. 23 - 29.

Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности // Сейсмическое районирование СССР [Текст] / Под ред. проф. С.В. Медведева. - М.: Наука, 1968. - С. 151 - 162.

Медведев С.В. Определение интенсивности колебаний // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1978. - Вып. 19. - С. 108 - 105.

Миронов П.С. Действие взрывов на устойчивость бортов карьеров // Сейсмическое действие промышленных взрывов. - 1966. - Инф. вып. № В-161.

Михайлова Н.Н. Количественные характеристики сейсмических колебаний на территории г. Алма-Аты // Сильные движения при землетрясениях [Текст] : научное издание / Н.Н. Михайлова. - Душанбе: Дониш, 1988. - С. 237 - 349.

Михайлова Н.Н. Прогноз сейсмических воздействий при учете местных условий. Автореферат диссертации ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.12. - Москва, 1983. - 24 с.

Михайлова Н.Н. Сейсмическая опасность в количественных параметрах сильных движений грунта (на примере г. Алма-Аты): дисс. ... докт. физ.-мат. наук. - М.: ОИФЗ РАН, 1996. - 259 с.

Назаров Ю.П. Аналитические основы расчета сооружений на сейсмические воздействия / Ю.П. Назаров. - М.: Наука, 2010. - 468 с.

Назаров Ю.П. Расчетные модели сейсмических воздействий / Ю.П. Назаров. - М.: Наука, 2012. - 416 с.

Назаров Ю.П. Расчетные параметры волновых полей сейсмических движений грунта / Ю.П. Назаров. - М.: Наука, 2015. - 376 с.

Назаров Ю.П., Аюнц В.А., Джинчвелашвили Г.А. Численные параметры векторов сейсмического воздействия Газлийского землетрясения 1976 г. // Строительная механика и расчет сооружений. - 1984. - № 2. - С. 41 – 46.

Нестерова О.П., Ткаченко А.С., Уздин А.М., Долгая А.А., Смирнова Л.Н., Гуань Юхай. К вопросу о задании уровня сейсмического воздействия в шкалах балльности и нормах проектирования // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2018. - Т. 45, № 1. - С. 77–92. - DOI: 10.21455/VIS2018.4-5

Николаев А.В. Сейсмические свойства грунтов [Текст] / Акад. наук СССР. Ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. - М.: Наука, 1965. - 184 с.

Николаенко Н.А., Назаров Ю.П. Динамика и сейсмостойкость сооружений / Н.А. Николаенко, Ю.П. Назаров. - М.: Стройиздат, 1988. - 222 с.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. [Текст] / АН СССР, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву, Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта. - М.: Наука, 1977. - 536 с.

НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. - М.: Госатомнадзор России, 2001. - 38 с.

Павленко О.В. Сейсмические волны в грунтовых слоях: нелинейное поведение грунта при сильных землетрясениях последних лет / О.В.Павленко. - М.: Научный мир, 2009. - 260 с.

Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под ред. Г.А.Соболева. - М: Крук, 2000. - 296 с.

РБ-006-98. Определение исходных сейсмических колебаний грунта для проектных основ. - М.: Госатомнадзор России, 2000. - 76 с.

Рустанович Д.Н. Колебания поверхности земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений [Текст] / АН СССР. Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойкому стр-ву. Ин-т физики Земли им. О.Ю. Шмидта - М.: Наука, 1974. - 97 с.

Садовский М.А. Оценка сейсмически опасных зон при взрывах // Тр. сейсмол. ин-та АН СССР. - 1941. - № 106. - С. 64 - 73.

Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов: [Текст] / М.А. Садовский; Акад. наук СССР. Ин-т горного дела. - Москва ; Ленинград : Изд. и 1-я тип. Изд-ва Акад. наук СССР в Л., 1946. - 29 с.

Садовский М.А. Сейсмический эффект взрывов : [Текст] Материалы для участников конференции. Москва. 1939 год / Всес. науч. инж.-тех. горное о-во. Всес. трест по буровзрыв. работам "Союзвзрывпром" / М.А.Садовский. - М.: Гостоптехиздат, 1939. - 36 с.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема очага// Доклады АН СССР. - 1983. - Т. 221, № 3. - С. 598 – 602.

Сафонов Л.В., Кузнецов Г.В. Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов [Текст] / Л.В. Сафонов, Г.В. Кузнецов.. - М.: Наука, 1967. - 102 с.

Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. - 10-е изд., доп. - М.: Наука, 1987. - 430 с.

Сейсмическое районирование территории СССР [Текст]: методологические основы и региональное описание карты 1978 г. / [В.И. Бунэ, Г.П. Горшков, В.Н. Крестников и др.; отв. ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков]. - М.: Наука, 1980. - 307 с.

Смирнов В.И., Вахрина Г.Н. Развитие моделей расчетных акселерограмм сейсмических воздействий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2011.- № 4. - С. 26 – 34.

Соловьев С.Л., Пустовитенко А.И. О возможном уменьшении периода продольной волны с глубиной очага землетрясения // Изв. АН СССР. Серия геофизическая. - 1964. - № 6. - С. 839 - 846.

Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений [Текст]: [Сборник статей] / Под ред. д-ра техн. наук проф. Б. Г. Коренева ; М-во строительства предприятий тяжелой индустрии СССР; Техн. упр. ; Центр. науч.-исслед. ин-т пром. сооружений "ЦНИПС". - Москва; Ленинград: Стройиздат, 1951. - 160 с.

Составление карты детального сейсмического районирования территории Ставропольского края: отчет о НИР в 6 томах. - М.: ОИФЗ, 1996. - Т. 6. - 269 с.

СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах СНиП II-7-81\*. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*. - М.: Стандартинформ, 2018. - 116 с.

СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. - М.: Стандартинформ, 2017.- 21 с.

СП 286.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила детального сейсмического районирования. - М.: Стандартинформ, 2017. - 36 с.

Уздин А.М., Сандович Т. А., Самих Амин А.-Н.-М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. - СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993. - 175 с.

Уломов В.И. Инструментальные наблюдения сейсмических проявлений Восточно-Карпатских землетрясений на территории Москвы // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2009. - № 3.- С. 34 – 42.

Харкевич А.А. Спектры и анализ / А.А.Харкевич. - Москва: Физматгиз, 1962. - 236 с.

Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология / Э.Е.Хачиян. - Ереван: Гитутюн, 2008. - 491 с.

Ходжаев А. Закономерности изменения видимых периодов и длительности сейсмических колебаний // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Ашхабадского землетрясения (Ашхабад, октябрь 1998). - Ашхабад: Дамана, 1999. - С. 123 - 126.

Ходжаев А. Результаты расчета полной логарифмической ширины спектра Фурье для скоростей // Сборник научных трудов “Экологическая безопасность и природопользование” МОиН Украины, Киевского НУСиА, НАН Украины, Института ТиГИП. - Киев, 2011. - Вып. 7. - С. 212 – 220.

Ходжаев А., Клименко В.И. Средний нормированный спектр реакции (Фурье) скоростей для условий Туркменистана и экологическая безопасность // Екологічна безпека та природокористування. - 2012. - С. 58 – 64.

Чернов Ю.К. Закономерности изменения спектра колебаний грунта в ближней зоне землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1984. - Вып. 25. - С. 16 – 28.

Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий / Ю.К.Чернов. - Ташкент: ФАН, 1989. - 295 с.

Шебалин Н.В. Сильные землетрясения : Избр. тр. / Н.В. Шебалин; Рос. акад. наук, Объед. ин-т физики Земли им. О. Ю. Шмидта. - М.: Изд-во Акад. горных наук, 1997. - 542 с.

Шебалин Н.В., Аптикаев Ф.Ф. Развитие шкал типа MSK // Вычислительная сейсмология. - 2003. - Вып. 34. - С. 210 - 253.

Шерман С.И., Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Аптикаев Ф.Ф. Региональная Шкала Сейсмической Интенсивности для прибайкалья (РШСИ-2000) / С.И.Шерман, Ю.А.Бержинский, В.А.Павленов, Ф.Ф.Аптикаев. - Иркутск: ИЗК СО РАН, 2000. - 33 с.

Штейнберг В. В. Колебания поверхности Земли вблизи очагов сильных землетрясений: диссертация ...доктора физ.-мат. наук : 01.04.12. - Москва: ИФЗ АН СССР, 1985. - 375 с.

Штейнберг В.В., Пономарева О.Н. О размерах очагов сильных землетрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1987. - Вып. 28. - С. 63 – 72.

Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф., Алказ В.Г., Гусев А.А., Ерохин Л.Ю., Заградник И., Кендзера А.В., Коган Л.А., Лутиков А.И., Попова Е.В., Раутиан Т.Г., Чернов Ю.К. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) [Текст] : научное издание / В. В. Штейнберг [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. - 1993. - Вып. 34. - С. 5 - 94.

Эртелева О.О. Ближняя зона Нефтегорского землетрясения 27(28).05.95 г. // Физика Земли. - 1998. - № 9. - С. 62 – 69.

Эртелева О.О. Оценка ожидаемых сейсмических воздействий от удаленных землетрясений // Инженерные изыскания. - 2013. - № 7. - С. 58 – 67.

Эртелева О.О. Прогноз уровня вертикальной компоненты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2011. - № 1. - С. 52 – 55.

Эртелева О.О. Спектры реакции в скоростях: оценки параметров и формы // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2015. - Т.42, №4. - С. 5 – 14.

Эртелева О.О. Эмпирический метод прогнозирования параметров сейсмического движения грунта // Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства : Сборник трудов II Международной научной конференции молодых ученых по современным задачам геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства (Гюмри – Ереван-Цахкадзор, 26 – 29 мая 2015 г.) - ИГИГ НАН, 2015.- С. 33 - 41.

Эртелева О.О., Аптикаев Ф.Ф. Создание банка региональных синтетических акселерограмм // Вопросы инженерной сейсмологии. - 2016. - Т. 43, № 2. - С. 30 – 36.

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

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.

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

A Workshop on “USGS’s New Generation of Probabilistic Ground Motion Maps and their Applications to Building Codes” / Proceedings of the Conference XLVII.: Open File Report 89-364. - Reston, Virginia, 1989. - 124 p.

Abrahamson N. A., Litehiser J. J. Attenuation of vertical peak acceleration // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1989. - V. 79, № 3. - Pp. 549 – 580.

Abrahamson N. A., Silva W. J. Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes // *Seismological Research Letters*. - 1997. V. 68, № 1. - Pp. 94 – 127.

Abrahamson N. A., Silva W. J. Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations // *Earthquake Spectra*. - 2008. - V. 24, № 1. - Pp. 67 – 97. DOI: 10.1193/1.2924360

Abrahamson N. A., Silva W. J., Kamai R. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions // *Earthquake Spectra*. - 2014. - V. 30, № 3. – Pp. 1025 – 1055. DOI: 10.1193/070913EQS198M

Accelerograms 028 through 064. Accelerograms from the Friuli, Italy, earthquake of May 6, 1976 and aftershocks / Strong – motion earthquake accelerograms. Digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. -V. 1, pt. 1. - Rome: Commissione CNEN – ENEL per la studio dei problemi sismici connessi can la realizzazione di impianti nucleari, 1976. – 218 p.

Accelerograms 065 through 119. Accelerograms from the Friuli, Italy, earthquake of May 6, 1976 and aftershocks / Strong – motion earthquake accelerograms. Digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. - V. 1, pt. 2. - Rome: Commissione CNEN – ENEL per la studio dei problemi sismici connessi can la realizzazione di impianti nucleari, 1977a. – 446 p.

Accelerograms 120 through 177. Accelerograms from the Friuli, Italy, earthquake of May 6, 1976 and aftershocks / Strong – motion earthquake accelerograms. Digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. - V. 1, pt. 3. - Rome: Commissione CNEN – ENEL per la studio dei problemi sismici connessi can la realizzazione di impianti nucleari, 1977b. – 524 p.

Aghabarati H., Tehranizadeh M. Near-source attenuation relationship for the geometric mean horizontal component of peak ground acceleration and acceleration response spectra // *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. - 2008. - V. 9, № 3. - Pp. 261 – 290.

Aghabarati H., Tehranizadeh M. Near-source ground motion attenuation relationship for PGA and PSA of the vertical and horizontal components // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2009. - V. 7, № 3. - Pp. 609 – 635. DOI: 10.1007/s10518-009-9114-9

Akkar S., Bommer J.J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region and the Middle East // *Seismological Research Letters*. - 2010. - V. 81, № 2. - Pp. 195 – 206. - DOI: 10.1785/gssrl.81.2.195

Akkar S., Bommer J.J. Empirical prediction equations for peak ground velocity derived from strong-motion records from Europe and the Middle East // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2007. - V. 97, № 2. - Pp. 511 – 530. - DOI: 10.1785/0120060141

Akkar S., Bommer J.J. Prediction of peak ground velocity for Europe and surrounding countries // *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (Geneva, September 3 – 8, 2006)*. - Geneva, Switzerland, 2006. - Paper no. 631.

Akkar S., Çagnan Z. A local ground-motion predictive model for Turkey and its comparison with other regional and global ground-motion models // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2010. - V. 100, № 6. - Pp. 2978 – 2995. - DOI: 10.1785/0120090367

Akkar S., Ozen O. Effect of peak ground velocity on deformation demands for SDOF systems // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 2005. - V. 34, № 13. - Pp. 1551 – 1571. - DOI: 10.1002/eqe.492

Akkar S., Sandikkaya M.A., Ay B.O. Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader European region // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2014a. - V. 12, № 1. - Pp. 517 – 547. - DOI: 10.1007/s10518-013-9537-1

Akkar S., Sandikkaya M.A., Bommer J.J. Empirical ground-motion models for point- and extended source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2014b. - V. 12, № 1. - Pp. 359 – 387. - DOI: 10.1007/s10518-013-9461-4

Allen R.M., Kanamori H. The potential for earthquake early warning in southern California // *Science*. - 2003. - V. 300, № 5620. - Pp. 786 – 789. - DOI: 10.1126/science.1080912

Al-Qaryouti M.Y. Attenuation relations of peak ground acceleration and velocity in the Southern Dead Sea Transform region // *Arabian Journal of Geosciences*. - 2008. - V. 1, № 2. - Pp. 111 - 117. - DOI: 10.1007/s12517-008-0010-4

Ambraseys N., Douglas J., Sigbjornsson R., Berge-Thierry C., Suhadolc P., Costa G., Smith P. European Strong - Motion Database. - Engineering and Physical Sciences Research Council of the United Kingdom (GR-52114-01), 2004. - CD. - V. 2.

Ambraseys N., Smith P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F., Berge-Thierry C. European Strong - Motion Database. - European Commission, Directorate General XII Science, Research and Development Environment and Climate Programme (contract ENV – 4-CT97-0397), 2000. - CD.

Ambraseys N.N. Preliminary analysis of European strong-motion data 1965-1978 // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 1978. - V. 4, № 1. - Pp. 17 - 37.

Ambraseys N.N. The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1995. - V. 24, № 4. - Pp. 467 – 490.

Ambraseys N.N., Bommer J.J. Database of European strong ground-motion records // *Journal of European Earthquake Engineering*. - 1991. - V. 2. - Pp. 18 - 37.

Ambraseys N.N., Douglas J. Near-field horizontal and vertical earthquake ground motions // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2003. - V. 23, № 1. - Pp. 1 – 18. - DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00153-7

Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2005a. - V. 3, № 1. - Pp. 1 – 53. - DOI: 10.1007/s10518-005-0183-0

Ambraseys N.N., Douglas J., Sarma S.K., Smit P.M. Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from Europe and the Middle East: Vertical peak ground acceleration and spectral acceleration // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2005b. - V. 3, № 1. - Pp. 55 – 73. - DOI: 10.1007/s10518-005-0186-x

Ambraseys N.N., Simpson K.A. Prediction of vertical response spectra in Europe // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1996. - V. 25, № 4. - Pp. 401 – 412.

Amiri G., Khorasani M., Hessabi M., & Razavian Amrei, S. A. Ground motion prediction equations of spectral ordinates and Arias intensity for Iran // *Journal of Earthquake Engineering*. - 2010. - V. 14, № 1. - Pp. 1 – 29. - DOI: 10.1080/13632460902988984

Anderson J.G., Hough S.E. A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1984. - V. 74, № 5. - Pp. 1969 - 1993.

Anderson J.G., Uchiyama Y. A methodology to improve ground-motion prediction equations by including path corrections // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2011. - V. 101, № 4. - Pp. 1822 - 1846. - DOI: 10.1785/0120090359

Anderson, J.C., Richards, P.G. Comparison of strong ground motion from several dislocation models // *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. - 1975. V. 42, № 2. - Pp. 347 – 373.

Ansary M.A. Engineering characteristics of ground motions recorded by northeast Indian strong motion instrumentation network from 2005 to 2013 // Proceedings of the Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering (Anchorage, July 21 – 25, 2014). - Alaska, USA, 2014. - Paper ID 719.

Antoineta E., Buffiereb H., Kovalcikova K. Time dependent earthquake modeling of an earth dam // 1st International Conference on the Material Point Method, MPM 2017. - Procedia Engineering. - 2017. - V. 175. - Pp. 65 – 71.

Aptikaev F. Review of empirical scaling of strong ground motion for seismic hazard analysis/ Selected topics in earthquake engineering - from earthquake source to seismic design and hazard mitigation / ed. Mihailo D. Trifunac / International conference on earthquake engineering (Banja Luka, 2009). - Banja Luka, Republic of Srpska, B&H: N.I.G.D. Nezavisne novine, d.o.o., 2009. - Pp. 27 - 54.

Aptikaev F., Ananyin I., Berzhinsky Y., Eisenberg J., Erteleva O., Klyachko M., Pavlenov V., Rogozhin E., Sherman S., Shestoperov G. Project of Russian Seismic Intensity Scale RIS-04 // Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (Geneva, September 3 – 8, 2006). - Geneva, Switzerland, 2006. - CD. - Full Paper ID 1291.

Aptikaev F., Erteleva O. Features of seismic waves propagation near fault. [Электронный ресурс] // Proceedings of the XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). - Presentation 6374. - USMA, 2007. - ISBN 978-88-95852-25-6 - URL:<http://www.iugg.org/assemblies/2007perugia/> (дата обращения 20.05.2019)

Aptikaev F., Kopnichev Yu. Correlation between seismic vibration parameters and type of faulting // Proceedings of the VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8 – 13, 1980). - Istanbul, Turkey, 1980. - V. 1. - Pp. 107 - 110.

Aptikaev F.F. The Parameterization of Strong-Motion Records // Proceedings of the XXIII General Assembly of IASPEI (Tokyo, 1985). - Tokyo, Japan, 1985. - Symp. № 8.

Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Design of specific site response spectrum // Proceedings of the XIV World Conference on Earthquake Engineering (Beijing, October 12 – 17, 2008). - Beijing, China, 2008. - CD. - Paper ID 08-02-0021.

Aptikaev F.F., Erteleva O.O. Some problems of the synthetic accelerograms generation // Proceedings of the International Conference “Earthquake Engineering in the 21st Century” to mark 40 years of IZIIS – Skopje (Skopje - Ohrid, August 27 - September 1, 2005). - Skopje - Ohrid, Macedonia, 2005. - CD. - Paper e034.

Aptikaev F.F., Erteleva O.O., Sacks M. Properties of response spectra. [Электронный ресурс] // Proceedings of the XXIV IUGG General Assembly (Perugia, July, 2 – 13, 2007). - USMA, 2007. - ISBN 978-88-95852-25-6 - Presentation 6387. - URL: <http://www.iugg.org/assemblies/2007perugia/> (дата обращения 20.05.2019)

Arias A. A Measure of Earthquake Intensity // Seismic Design for Nuclear Power Plants / R.J. Hansen, ed. - MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970. - Pp. 438 - 483.

ASCE/SEI Standard 7 - 10. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. - Reston, Virginia; 2010. - 593 p.

Ashford S.A., Jakrapiyanun W., Lukkunaprasit P. Amplification of earthquake ground motions in Bangkok // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 30 - February 4, 2000). - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 1466.

Atkinson G.M., Boore D.M. Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2003. - V. 93, № 4. - Pp. 1703 – 1729. - DOI: 10.1785/0120020156

Atkinson G.M., Boore D.M. Ground-Motion Relations for Eastern North America// Bulletin of the Seismological Society of America. - 1995. - V. 85, № 1. - Pp. 17 - 30.

Ay B.Ö., Erberik M.A., Akkar S. Fragility based assessment of the structural deficiencies in Turkish rc frame structures // Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (Geneva, September 3 – 8, 2006). -Geneva, Switzerland, 2006. - CD. - Full Paper ID 539.

Aydan Ö., Sedaki M., Yazar R. The seismic characteristics of Turkish earthquakes // Proceedings of the XI World Conference on Earthquake Engineering (Acapulco, June 23 - 28, 1996). - Acapulco, Mexico, 1996. - Paper No. 1270.

Baker J.W. Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-motion Selection // Journal of Structural Engineering. - 2010. - V. 137, № 3. - Pp. 322 – 331.

Basham P.W., Weichert D.H., Anglin F.M., Berry M.J. New probabilistic strong ground motion maps of Canada // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1985. - V. 75, № 2. - Pp. 563 – 595.

Berardi R., Berenzi A., Capozza F. Campania – Lucania earthquake on 23 November 1980. Accelerometric recordings of the main quake and relating processing. - Rome: ENEA – ENEL commission on seismic problems associated with the installation of nuclear plant, 1981. - 103 p.

Beresnev I.A. Nonlinearity at California generic soil sites from modeling recent strongmotion data // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2002. - V. 92, № 2. - Pp. 863 – 870. - DOI: 10.1785/0120000263

Beresnev I.A., Field E.H., Van Den Abeele K., Johnson P.A., 1998. Magnitude of nonlinear sediment response in Los Angeles basin during the 1994 Northridge, California, earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1998. - V.88, № 4. - Pp. 1079 – 1084.

Berge-Thierry C., Cotton F., Scotti O., Griot-Pommeret D.-A., Fukushima Y. New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes // Journal of Earthquake Engineering. - 2003. - V. 7, № 2. - Pp. 193 – 222.

Bindi D., Cotton F., Kotha S. R., Bosse C., Stromeyer D. and Grünthal G. Application-driven ground motion prediction equation for seismic hazard assessments

in non-cratonic moderate-seismicity areas // *Journal of Seismology*. - 2017. - V. 21, № 5. - Pp. 1201 – 1218. - DOI: 10.1007/s10950-017-9661-5.

Bindi D., Luzi L., Massa M., Pacor F. Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA) // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2010. - V. 8, № 5. - Pp. 1209 – 1230. - DOI :10.1007/s10518-009-9130-9

Bindi D., Luzi L., Pacor F., Franceshina G. and Castro R. R. Ground-motion predictions from empirical attenuation relationships versus recorded data: The case of the 1997 - 1998 Umbria-Marche, central Italy, strong-motion data set // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2006. - V. 96, № 3. - Pp. 984 – 1002. - DOI: 10.1785/0120050102

Bindi D., Massa M., Luzi L., Ameri G., Pacor F., Puglia R., Augliera P. Pan-European ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods up to 3:0 s using the RESORCE dataset // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2014. - V. 12, № 1. - Pp. 391 – 430. - DOI: 10.1007/s10518-013-9525-5

Bindi D., Parolai S., Grosser H., Milkereit C., Durukal E. Empirical ground-motion prediction equations for northwestern Turkey using the aftershocks of the 1999 Kocaeli earthquake // *Geophysical Research Letters*. - 2007. - V. 34, № 8. - CiteID L08305 ([GeoRL Homepage](#)). - DOI: 10.1029/2007GL029222

Blume J.A. The SAM procedure for site – acceleration –magnitude relationships // *Proceedings of the VI World Conference on Earthquake Engineering (New Delhi, January 10 - 14, 1977)*. - New Delhi, India, 1977. - V. 1. - Pp. 416 – 422.

Bolt B.A. Duration of strong ground motion // *Proceedings of the V World Conference on Earthquake Engineering (Rome, 1973)*. - Rome, Italy, 1973. - V. 1. - Paper No. 292. - Pp. 1304 – 1313.

Bommer J.J., Elnashai A.S., Weir A.G. Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes // *Proceedings of the XII World*

Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 0207.

Bommer J.J., Martinez-Pereira A. Strong-motion parameters: definition, usefulness and predictability // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – February 4, 2000). - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 0206.

Bommer J.J., Martínez-Pereira A. The effective duration of earthquake strong motion // Journal of Earthquake Engineering. - 1999. - V. 3, № 2. - Pp. 127 – 172.

Bommer J.J., Stafford P.J., Akkar S. Current empirical ground-motion prediction equations for Europe and their application to Eurocode 8 // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2010. - V. 8, № 1. - Pp. 5 - 26. - DOI: 10.1007/s10518-009-9122-9

Bommer J.J., Stafford P.J., Alarcón J.E. Empirical Equations for the Prediction of the Significant, Bracketed, and Uniform Duration of Earthquake Ground Motion // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2009. - V. 99, № 6. - Pp. 3217 – 3233. - DOI: 10.1785/0120080298

Bommer J.J., Stafford P.J., Alarcón J.E., Akkar S. The influence of magnitude range on empirical ground-motion prediction // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2007. - V. 97, № 6. - Pp. 2152 - 2170. - DOI: 10.1785/0120070081

Boore D.M. Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method // Pure and Applied Geophysics. - 2003. - V. 160, № 3 – 4. - Pp. 635 – 676.

Boore D.M. SMSIM – FORTRAN programs for simulating ground motions from earthquakes: version 2.3 – a revision of OFR 96 – 80 –A. USGS, 2005. 56 p.

Boore D.M. Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1983. - V. 73, № 6A. - Pp. 1865 – 1894.

Boore D.M., Atkinson G.M. Boore-Atkinson NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion

parameters. PEER Report 2007/01. - Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2007. - 110 p.

Boore D.M., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0:01 s and 10:0 s // *Earthquake Spectra*. - 2008. - V. 24, № 1. - Pp. 99 - 138. - DOI: 10.1193/1.2830434

Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western north American earthquakes: a summary of recent work // *Seismological Research Letters*. - 1997.- V. 68, № 1. - Pp. 128 - 153. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.128

Boore D.M., Stewart J.P., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes // *Earthquake Spectra*. - 2014. - V. 30, № 3. - Pp. 1057 – 1085. DOI: 10.1193/070113EQS184M

Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G., Kondis A., Bakas G.J. Equivalent-uniform soil model for the seismic response analysis of sites improved with inclusions // *Proceedings of the 6th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (Graz, September 6 - 8, 2006) - Graz, Austria, 2006. - Pp. 801 – 808.*

Bozorgnia Y., Campbell K.W. The vertical-to-horizontal response spectral ratio and tentative procedures for developing simplified V/H and the vertical design spectra // *Journal of Earthquake Engineering*. - 2004. - V. 8, № 2. - Pp. 175 – 207. - DOI: 10.1142/S1363246904001481

Bozorgnia Y., Campbell K.W. Vertical ground motion model for PGA, PGV, and linear response spectra using the NGA-West2 database // *Earthquake Spectra*. - 2016. - V. 32, № 2. - Pp. 979 – 1004. - DOI: 10.1193/072814EQS121M

Bozorgnia Y., Hachem M.M., Campbell K.W. Ground motion prediction equation (“attenuation relationship”) for inelastic response spectra // *Earthquake Spectra*. - 2010. - V. 26, № 1. - Pp. 1 – 23. - DOI: 10.1193/1.3281182

Bozorgnia Y., Niazi M., Campbell K.W. Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake // *Earthquake Spectra*. - 1995. - V. 11, № 4. - Pp. 515 – 525.

Bozorgnia Y., Niazi, M. Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1993. - V. 22, № 8. - Pp. 695 – 707. - DOI: 10.1002/eqe.4290220805

Brady A.G., Perez V. Strong-motion earthquake accelerograms digitization and analysis records from Lima, Peru, 1951 to 1974. USGS Open-File Report 77-587. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1977 - 159 p. - DOI: 10.3133/ofr77587

Brady A.G., Perez V. Strong-motion earthquake accelerograms digitization and analysis USGS Open-File Report 78-941. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1978 - 132 p. - DOI: 10.3133/ofr78941

Brady A.G., Perez V. U.S. Geological Survey seismic engineering data report, 1974-75 records; strong-motion earthquake accelerograms digitization and analysis USGS Open-File Report 79-929. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1979. - 180 p. - DOI: 10.3133/ofr79929

Bragato P.L. Assessing regional and site-dependent variability of ground motions for ShakeMap implementation in Italy // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2009. - V. 99, № 5. - Pp. 2950 – 2960. - DOI: 10.1785/0120090020

Bragato P.L., Slejko D. Empirical ground-motion attenuation relations for the eastern Alps in the magnitude range 2.5 - 6.3 // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2005. - V. 95, № 1. - Pp. 252 – 276. - DOI: 10.1785/0120030231

*Bulletin of the Strong-Motion Earthquake Accelerograms*. - 1984. - № 1 – 3. Univ. “Kirill and Methodij”, Skopje, Yugoslavia, 1984.

Bureau G.J. Near-source peak ground acceleration // *Earthquake Notes*. - 1981. - V. 52, № 1. - P. 81.

Çagnan Z., Akkar S., Ö Kale, Sandikkaya A. A model for predicting vertical component peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), and 5%

damped pseudospectral acceleration (PSA) for Europe and the Middle East // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2017. - V. 15, № 7. - Pp. 2617 – 2643. - DOI: 10.1007/s10518-016-0063-9

Caillot V., Bard P.Y. Magnitude, distance and site dependent spectra from Italian accelerometric data // *European Earthquake Engineering*. - 1993. - № 1. - Pp. 37 – 48.

Campbell K.W. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra // *Seismological Research Letters*. - 1997. - V. 68, № 1. - Pp. 154 – 179. - DOI: 10.1785/gssrl.68.1.154

Campbell K.W. Empirical prediction of near-source soil and soft-rock ground motion for the Diablo Canyon power plant site, San Luis, Obispo County, California: technical report. - Dames & Moore, Evergreen, Colorado, Sep., 1990 / Prepared for Lawrence Livermore National Laboratory // Reported in Idriss I. M. Procedures for selecting earthquake ground motions at rock sites: technical report NIST GCR93-625. - National Institute of Standards and Technology, 1993.

Campbell K.W. Erratum: Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra // *Seismological Research Letters*. - 2000. - V. 71, № 3. - Pp. 352 – 354. - DOI: 10.1785/gssrl.71.3.352

Campbell K.W. Near-source attenuation of peak horizontal acceleration // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1981. - V. 71, № 6. - Pp. 2039 – 2070.

Campbell K.W. The dependence of peak horizontal acceleration on magnitude, distance, and site effects for small magnitude earthquakes in California and eastern North America // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1989. - V. 79, № 5. - Pp. 1311 – 1346.

Campbell K.W., Bozorgnia Y. A ground motion prediction equation for the horizontal component of cumulative absolute velocity (CAV) based on the PEER-NGA strong motion database // *Earthquake Spectra*. - 2010. - V. 26, № 3. - Pp. 635 – 650. - DOI: 10.1193/1.3457158

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Campbell-Bozorgnia Next Generation Attenuation (NGA) relations for PGA, PGV and spectral acceleration: A progress report // *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (San Francisco, April 18 - 22, 2006)*. - San Francisco, USA, 2006. - Paper No. 906.

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Campbell-Bozorgnia NGA ground motion relations for the geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters / *PEER Report 2007/02*. - Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2007. - 240 p.

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Near-Source attenuation of peak horizontal acceleration from worldwide accelerograms recorded from 1975 to 1993 // *Proceedings of the 5th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (Chicago, July 10 – 14, 1993)*. - Oakland, USA, 1994. - V. 3. - Pp. 283 – 292.

Campbell K.W., Bozorgnia Y. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped linear acceleration response spectra // *Earthquake Spectra*. - 2014. - V. 30, № 3. - Pp. 1087 - 1115. - DOI: 10.1193/062913EQS175M

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Updated near-source ground-motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2003. - V. 93, № 1. - Pp. 314 – 331. - DOI: 10.1785/0120020029

Campbell K.W., Bozorgnia Y. Use of cumulative absolute velocity (CAV) in damage assessment // *Proceedings of the XV World Conference on Earthquake Engineering (Lisbon, September 24 – 28, 2012)*. - Lisbon, Portugal, 2012. - V. 22. - Pp. 17370 – 17379.

Catalogue of U.S. Geological survey strong – motion records, ... 1986 – 1994  
// Geological survey circular. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1989 – 1997.

Cauzzi C., Faccioli E., Vanini M., Bianchini A. Updated predictive equations for broadband (0:01 - 10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2015. - V. 13, № 6. - Pp. 1587 - 1612. - DOI: 10.1007/s10518-014-9685-y

Chandradhara G.P, Nanjundaswamy P., Prasad S.K. Why response spectrum approach in earthquake geotechnical engineering? // Proceedings of the Indian Geotechnical Conference (Kochi, December 15 - 17, 2011). - Kochi, India, 2011. - Paper No. F-359. - Pp. 309 - 312.

Chiaruttini C., Crosilla F., Siro L. Some maximized acceleration analysis of the 1976 Friuli earthquakes // Boll. Geof. Teor. Appl. - 1979. - V. XXI. - Pp. 38 - 52.

Chiaruttini C., Siro L. The correlation of peak ground horizontal acceleration with magnitude, distance, and seismic intensity for Friuli and Ancona, Italy, and the Alpidic belt // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1981. - V. 71, № 6. - Pp. 1993 - 2009.

Chiou B. S.-J., Youngs R.R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // Earthquake Spectra. - 2008. - V. 24, № 1. - Pp. 173 - 215. DOI: 10.1193/1.2894832

Chiou B., Youngs R., Abrahamson N., Addo K. Ground-motion attenuation model for small-to-moderate shallow crustal earthquakes in California and its implications on regionalization of ground-motion prediction models // Earthquake Spectra. - 2010. - V. 26, № 4. - Pp. 907 - 926. - DOI: 10.1193/1.3479930

Chiou B.S.-J., Youngs R.R. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra // Earthquake Spectra. - 2014. - V. 30, № 3. - Pp. 1117 - 1153. - DOI: 10.1193/072813EQS219M

Chopra A.K. Dynamics of Structures — Theory and Application to Earthquake Engineering. - Prentice Hall International, Englewood Cliffs, NJ, 1995. - 944 p.

Chopra A.K. Elastic response spectrum: a historical note // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 2007. - V. 36, № 1. - Pp. 3 – 12. - DOI: 10.1002/eqe.609

Chopra S., Choudhury P. A study of response spectra for different geological conditions in Gujarat, India // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2011. - V. 31, № 11. - Pp. 1551 - 1564. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.06.007

Chou C.-C., Uang C.-M. Establishing absorbed energy spectra - an attenuation approach // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 2000. - V. 29, № 10. - Pp. 1441 – 1455. - DOI: 10.1002/1096-9845(200010)29:10<1441::AID-EQE967>3.0.CO;2-E

Cornell C.A., Banon H., Shakal A.F. Seismic motion and response prediction alternatives // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 1979. - V. 7, № 4. - Pp. 295 – 315.

Cousins W.J., Zhao J.X., Perrin N.D. A model for the attenuation of peak ground acceleration in New Zealand earthquakes based on seismograph and accelerograph data // Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. - 1999. - V. 32, № 4. - Pp. 193 – 220.

Crouse C.B., McGuire J.W. Site response studies for purpose of revising NEHRP seismic provisions // Earthquake Spectra. - 1996. - V. 12, № 3. - Pp. 407 – 439.

CSA, Standard № 289.3-10. Design Procedures for Seismic Qualification of Nuclear Power Plants. - Mississauga, Ontario, 2010. - 108 p.

Danciu L., Tselentis G.-A. Engineering ground-motion parameters attenuation relationships for Greece // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2007. - V. 97, № 1B. – Pp: 162 – 183. - DOI: 10.1785/0120040087

Das D., Gupta V.K. Scaling of response spectrum and duration for aftershocks // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2010. - V. 30, № 8. - Pp. 724 – 735. - 2010. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2010.03.003

Das S., Gupta I.D., Gupta V. K. A new attenuation model for north-east India // *Proceedings of the 12th Symposium of Earthquake Engineering (Roorkee, December, 16 – 18, 2002)*. - IIT Roorkee, Roorkee, India, 2002. - Pp. 151 – 158. - DOI: 10.13140/RG.2.1.1528.0489

Das S., Gupta I.D., Gupta V. K. A probabilistic seismic hazard analysis of northeast India // *Earthquake Spectra*. - 2006. - V. 22, № 1. - Pp. 1 - 27. - DOI: 10.1193/1.2163914

Dashti S., Bray J.D., Pestana J.S., Riemer M., Wilson D. Centrifuge testing to evaluate and mitigate liquefaction-induced building settlement mechanisms // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. - 2010. - V. 136, № 7. - Pp. 918 – 929. - DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000306

Davis C.A., Bardet J.P. Responses of buried corrugated metal pipes to earthquakes // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. - 2000. - V. 126, № 1. - Pp. 28 – 39.

Derras B., Cotton F., Bard P.-Y. Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2014. - V. 12, № 1. - Pp. 495 - 516. DOI: 10.1007/s10518-013-9481-0

Dhakal Y.P., Takai N., Sasatani T. Path effects on prediction equations of pseudo-velocity response spectra in northern Japan // *Proceedings of the XIV World Conference on Earthquake Engineering (Beijing, October 12 – 17, 2008)*. - Beijing, China, 2008. - Paper ID 03-02-0023

Digitized strong-motion earthquake accelerograms in Japan 1972. - Tokyo, Gakujutsu Bunken Fukyukai, 1972. - 733 p.

Dost B., Van Eck T., Haak H. Scaling of peak ground acceleration and peak ground velocity recorded in the Netherlands // *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. - 2004. - V. 45, № 3. - Pp. 153 – 168.

Draper N.R., Smith H. *Applied Regression Analysis* / 2nd ed. - Wiley, New York, Chichester, 1981. - 671 p.

Du W., Wang G. A simple ground-motion prediction model for cumulative absolute velocity and model validation // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 2013. - V. 42, № 8. - Pp. 1189 - 1202. - DOI: 10.1002/eqe.2266

Dunbar W.S., Charlwood R.G. Empirical Methods for the Prediction of Response Spectra // *Earthquake Spectra*. - 1991. - V. 7, № 3. - Pp. 333 – 353.

Dvorak A. Experimentelle Bestimmung der Intensität von Sprengungerschütterungen // *Geofys. Sb.* - 1965. - № 12.

Eidinger J.M. Water distribution system // *The Loma Prieta, California, earthquake of October 17, 1989 – Lifelines performance of built environment-lifelines* / Schiff A.E. (Ed.). - Washington: USGS, 1998. - Pp. A63 - A80.

Emolo A., Sharma N., Festa G., Zollo A., Convertito V., Park J.-H., Chi H.-C. and Lim I.-S. Ground-motion prediction equations for South Korea peninsula // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2015. - V. 105, № 5. - Pp. 2625 - 2640. - DOI: 10.1785/0120140296

Erteleva O.O. Accuracy of seismic treatments assessments // *Expanded Abstract RAG-2011. International Seminar on Recent Advances in Geosciences* (Dhanbad, January 11 – 13, 2011). - Dhanbad, India, 2011. - P. 1 – 4.

Erteleva O.O., Aptikaev F.F. Empirical scaling of peak ground acceleration // *Proceedings of the 2nd annual International conference on Geological and Earth Sciences (GEOS 2013)* (Phuket, October 28 – 29, 2013). - Thailand, GSTF, 2013. - Pp. 137 – 138.

Espinosa A.F. Attenuation of Strong Horizontal Ground Acceleration in the Western United States and their Relation to  $M_L$  // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1980. - V. 70, №2. - Pp. 583 - 616.

Etheredge E.C., Porcella R.L., Maley R. P., Johnson D., Salsman M.J., Ellis F., Acosta A.V., Nielson J., Switzer J.C., Forshee R.D. Strong-motion data from the October 1, 1987, Whitter Narrows earthquake / USGS Open-File Report 87 - 616. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1987. - 64 p. - DOI: 10.3133/ofr87616

Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. - European Committee for Standardization, May 2002. - 213 p.

FEMA. [Электронный ресурс.] Hazus-MH, FEMA's software program for estimating potential losses from disasters. - 2003. - URL: <https://www.fema.gov/plan/prevent/hazus/index.shtm> (дата обращения 25.05.2019)

Feng J., Wang Zh., Woolery E.W., Li Sh. Comparison of the ground-motion attenuation relationship between the Wenchuan, China, area and the Central and Eastern United States. Kentucky Geological Survey report of investigations, 30. - University of Kentucky, Lexington, 2015. - 45 p. - <https://doi.org/10.13023/kgs.ri28.12>

Field E.H. A modified ground motion attenuation relationship for Southern California that accounts for detailed site classification and a basin depth effect // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2000. - V. 90, № 6B. - Pp. S209 - S221. - DOI: 10.1785/0120000507

Foulser-Piggott R., Goda K. Ground-motion prediction models for Arias intensity and cumulative absolute velocity for Japanese earthquakes considering single-station sigma and within-event spatial correlation // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2015. - V. 105, № 4. - Pp. 1903 - 1918. - DOI: 10.1785/0120140316

Frisenda M., Massa M., Spallarossa D., Ferretti G., Eva C. Attenuation relationship for low magnitude earthquakes using standard seismometric records //

Journal of Earthquake Engineering. - 2005. - V. 9, № 1. - Pp. 23 – 40. - DOI: 10.1142/S1363246905001839

Fukushima Y., Gariel J.-C., Tanaka R. Site-dependent attenuation relations of seismic motion parameters at depth using borehole data // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1995. - V. 85, № 6. - Pp. 1790 - 1804.

García-Soto A.D., Jaimes M.A. Ground-motion prediction model for vertical response spectra from Mexican interplate earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2017. - V. 107, № 2.- Pp. 887 - 900. - DOI: 10.1785/0120160273

Geller R.J. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1976. - V. 66, № 5. - Pp. 1501 - 1523.

Genschel G. Erschütterungsmessungen an Gebäuden Verschiedener Bauweisen // Der Bauingenieur. - 1962. - B. 37, H. 6.

Geotechnical Data Compilation for selected Strong Motion Seismograph Sites in California. - Oakland: Woodward-Lundgren & Associates, 1973.

Ghayoomi M., Dashti S. Effect of ground motion characteristics on seismic soil – foundation – structure interaction // Earthquake Spectra. - 2015. - V. 31, № 3. - Pp. 1789 – 1812. - DOI: 10.1193/040413EQS089M

Ghofrani H., Atkinson G.M. Ground-motion prediction equations for interface earthquake of M7 to M9 based on empirical data from Japan // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2014. - V. 12, № 2. - Pp. 549 - 571. - DOI: 10.1007/s10518-013-9533-5

Gómez-Bernal A., Lecea M.A., Juárez-García H. Empirical attenuation relationship for Arias intensity in Mexico and their relation with the damage potential // Proceedings of the XV World Conference on Earthquake Engineering (Lisbon, September 24 – 28, 2012). - Lisbon, Portugal, 2012. - V. 27. - Pp. 21670 - 21679.

Graizer V., Kalkan E. Prediction of Spectral Acceleration Response Ordinates Based on PGA Attenuation // Earthquake Spectra. - 2009. - V. 25, № 1. - Pp. 39 – 69. - DOI: 10.1193/1.3043904

Graizer V., Kalkan E. Summary of the GK15 ground-motion prediction equation for horizontal PGA and 5% damped PSA from shallow crustal continental earthquakes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2016. - V. 106, № 2. - Pp. 687 - 707. - DOI: 10.1785/0120150194.

Graizer V., Kalkan E.. Modular Attenuation Modeling // *Seismological Research Letters*. - 2011. - V. 82, № 1. - Pp. 21 - 31. - DOI: 10.1785/gssrl.82.1.21

Graizer V.M., Kalkan E. Ground Motion Attenuation Model for Peak Horizontal Acceleration from Shallow Crustal Earthquakes // *Earthquake Spectra*. - 2007. - V. 23, № 3. - Pp. 585 – 613. - DOI: 10.1193/1.2755949

Green R.A., Lee J., Cameron W., Arenas A. Evaluation of various definitions of characteristic period of earthquake ground motions // *Proceedings of the Fifth International conference on earthquake geotechnical engineering*, (Santiago, January 10 – 13, 2011). - Santiago, Chile, 2011. - Paper No. EOFGR.

Green R.A., Terri G.A. Number of equivalent cycles concept for liquefaction evaluations—revisited // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. - 2005. - V. 131, № 4. - Pp. 477 – 488. - DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:4(477)

Guan H., Quanli M., Zhiwei L., Kieping Y., Zhuge Y. Numerical and comparative study of earthquake intensity indices in seismic analysis // *The Structural Design of Tall and Special Building*. - 2011. - V. 22, № 4. - Pp. 362 - 381.

Gülerce Z., Abrahamson N.A. Site-specific design spectra for vertical ground motion // *Earthquake Spectra*. - 2011. - V. 27, № 4. - Pp. 1023 – 1047. - DOI: 10.1193/1.3651317

Gülerce Z., Kamai R., Abrahamson N.A., Silva W.J. Ground motion prediction equations for the vertical ground motion component based on the NGA-W2 database // *Earthquake Spectra*. - 2017. - V. 33, № 2. - Pp. 499 - 528. - DOI: 10.1193/121814EQS213M

Gupta I.D. Probabilistic Seismic Hazard Analysis Method for Mapping of Spectral Amplitudes and Other Design-Specific Quantities to Estimate the Earthquake Effects on Man-Made Structures // ISET Journal of Earthquake Technology. - 2007. - V. 44, № 1. - Pp. 127 - 167.

Gupta I.D., Trifunac M.D. Empirical scaling relations for pseudo relative velocity spectra in western Himalaya and northeastern India // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2018. - V. 106. - Pp. 70 – 89. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2017.12.005

Gusev A.A. Descriptive Statistical Model of Earthquake Source Radiation and Its Application to an Estimation of Short-Period Strong Motion // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. - 1983. - V. 74, № 3. - Pp. 787 – 808.

Hall W.J., Mohraz B., Newmark N.M. Statistical Studies of Vertical and Horizontal Earthquake Spectra / Report NUREG-0003. - Division of Systems Safety, U.S. Nuclear Regulatory Comm. - 1976.

Hancock J., Bommer J.J. A state-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage // Earthquake Spectra. - 2006. - V. 22, № 3. - Pp. 827 – 845. - DOI: 10.1193/1.2220576

Hancock J., Bommer J.J. The effective number of cycles of earthquake ground motion // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 2005. - V. 34, № 6. - Pp. 637 – 664. - DOI: 10.1002/eqe.437

Hanks T.C.  $f_{max}$  // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1982. - V. 72, № 6A. - Pp. 1867 – 1879.

Hanks T.S., Johnson D.A. Geophysical assessment of peak accelerations // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1976. - V. 66, № 3. - Pp. 959 - 968.

Hao M., Xie L.L., Xu L.J. Some considerations on the physical measure of seismic intensity // Acta Seismologica Sinica. - 2005. - V. 18, № 2. - Pp. 245 – 250. - DOI: 10.1007/s11589-005-0072-2

Haskell N.A. Elastic displacements in the near - field of propagating fault // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1969. - V. 59, № 2. - Pp. 865 - 908.

Hernandez B., Cotton F. Empirical determination of the ground shaking duration due to an earthquake using strong motion accelerograms for engineering applications // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 30 - February 4, 2000). - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 2254.

Herrman R.B. Earthquake generated SH waves in the near-field and near-regional field // Paper S-77—12. - U.S. Army Eng. Waterways Exp. Sta., C.E., Vicksburg, Miss., 1977. - 51 p.

Heydari M., Mousavi M. The comparison of seismic effects of near-field and far-field earthquakes on relative displacement of seven-storey concrete building with shear wall // Current world environment. - 2015. - V. 10, special issue 1. - Pp. 40 - 46.

Hough S.E., Anderson J.G., Brune J., Vernon F., Berger J., Fletcher J., Haar L., Hanks T., Baker L. Attenuation near Anza, California // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1988. - V. 78, № 2. - Pp. 672 - 691.

Hudson D.E. Reading and interpreting strong motion accelerograms. - EERI, 1979. - 112 p.

Ibrahim R., Si H., Koketsu K., Miyake H. Long-period ground-motion prediction equations for moment magnitude estimation of large earthquakes in Japan // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2016. - V. 106, № 1. - Pp. 54 - 72. DOI: 10.1785/0120140244

Idini B.B., Rojas F., Ruiz S., Pastén C. Ground motion prediction equations for the Chilean subduction zone // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2017. - V. 15, № 5. - Pp. 1853 - 1880. - DOI: 10.1007/s10518-016-0050-1.

Idriss I. M. Procedures for selecting earthquake ground motions at rock sites: technical report NIST GCR93-625. - National Institute of Standards and Technology, 1993.

Idriss I.M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes // *Earthquake Spectra*. - 2008. - V. 24, № 1. - Pp. 217 - 242. - DOI: 10.1193/1.2924362

Idriss I.M. An NGA-West2 empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes // *Earthquake Spectra*. - 2014. - V. 30, № 3. - Pp. 1155 - 1177. - DOI: 10.1193/070613EQS195M

Idriss I.M. Use of Vs30 to Represent Effects of Local Site Conditions on Earthquake Ground Motions / SSA 2009 Annual Meeting Announcement Seismological Society of America // *Seismological Research Letters*. - 2009. - V. 80, № 2. - Pp. 264 - 389. - DOI: 10.1785/gssrl.80.2.264. P. 363

Isoyama R., Ishida E., Yune K., Shirozu T. (2000). Seismic damage estimation procedure for water supply pipelines // *Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 30 - February 4, 2000)*. - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 1762.

Iwasaki T., Katayama T., Kawashima K., Saeki M. Statistical analysis of strong motion acceleration records obtained in Japan // *Proceedings of the Second International Conference on Microzonation for Safer Construction - Research and Application (San Francisco, November 26 – December 1, 1978)*. - National Science Foundation et al., San Francisco, 1978. - V. II.- Pp. 705 – 716.

Jin X., Kang L.-C., Ou Y.-P. Ground motion attenuation relation for small to moderate earthquakes in Fujian region, China // *Acta Seismologica Sinica*. - 2008. - V. 21, № 3. - Pp. 283 - 295. - DOI: 10.1007/s11589-008-0283-4

Joshi A. A simplified technique for simulating wide-band strong ground motion for two recent Himalayan earthquakes // *Pure and Applied Geophysics*. - 2004. -- V. 161, № 8. - Pp. 1777 – 1805. - DOI: 10.1007/s00024-004-2526-1

Joshi A., Kumar B., Sinvhal A., Sinvhal H. Generation of synthetic accelerograms by modeling of rupture plane // *ISET Journal of Earthquake Technology*. - 1999. - V. 36, № 1. - Pp. 43 - 60.

Joyner W.B., Boore D.M. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1981. - V. 71, № 6. - Pp. 2011 – 2038.

Joyner W.B., Fumal T.E. Use of measured shear-wave velocity for predicting geologic site effects on strong ground motion // *Proceedings of the VIII World Conference on Earthquake Engineering (San Francisco, July 21 - 28, 1984)*. - San Fransisco, USA, 1984. - V II. - Pp. 777 – 783.

Kaka S.I., Atkinson G.M. Relationships between instrumental ground motion parameters and Modified Mercalli Intensity in eastern North America // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2004. - V. 94, № 5. - Pp. 1728 – 1736. - DOI: 10.1785/012003228

Kale Ö., Akkar S., Ansari A., Hamzehloo H.. A ground-motion predictive model for Iran and Turkey for horizontal PGA, PGV, and 5% damped response spectrum: Investigation of possible regional effects // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2015. - V. 105, № 2A. - Pp. 963 - 980. - DOI: 10.1785/0120140134

Kalkan E., Chopra A.K. Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures: USGS Open-File Report 2010 - 1068. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 2010. - 124 p. - DOI: 10.3133/ofr20101068

Kalkan E., Gülkan P. Empirical attenuation equations for vertical ground motion in Turkey // *Earthquake Spectra*. - 2004. - V. 20, № 3. - Pp. 853 – 882. - DOI: 10.1193/1.1774183

Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. - 2005. - V. 33. - Pp. 195 – 214. - DOI: 10.1145/annurev.earth.33.092203.122626

Kawashima K., Aizawa K. Bracketed and normalized durations of earthquake ground acceleration // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1989. - V. 18, № 7. - Pp. 1041 – 1051.

Kawashima K., Aizawa K., Takahashi K. Attenuation of peak ground acceleration, velocity and displacement based on multiple regression analysis of Japanese strong motion records // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1986. - V. 14, № 2. - Pp. 199 – 215.

Kempton J.J., Stewart J.P. Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and nearsource effects // *Earthquake Spectra*. - 2006. - V. 22, № 4. - Pp. 985 – 1013. - DOI: 10.1193/1.2358175

Koch H. Zur Möglichkeit der Abgrenzung von Lademengen bei Steinbruchsprengungen nach festgestellten Erschütterungsstärken // *Nobelhefte*. - 1956. - B. 2.

Kostadinov M. V., Towhata I. Assessment of liquefaction inducing peak ground velocity and frequency of horizontal ground shaking at onset of phenomenon // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2002. - V. 22, № 4. - Pp. 309 – 322. - DOI: 10.1016/S0267-7261(02)00018-0

Kostov M. K. Site specific estimation of cumulative absolute velocity // *Proceedings of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18) (Beijing, August 7 - 12, 2005)*. - Beijing, China, 2005. - Paper No. K03 – 4.

Kotha S.R., Bindi D., Cotton F. Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2016. - V. 14, № 4. - Pp. 1245 - 1263. - DOI: 10.1007/s10518-016-9875-x

Kramer S.L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. - University of Washington, Pearson Education, 2009. - 653 p.

Ktenidou O.-J., Cotton F., Abrahamson N., Anderson J.G. Taxonomy of  $\kappa$  (kappa): a review of definitions and estimation methods targeted to applications //

Seismological Research Letters. - 2014. - V. 85, № 1. - Pp. 135 – 146. - DOI: 10.1785/0220130027

Kuehn N. M., Scherbaum F. A partially non-ergodic ground-motion prediction equation for Europe and the Middle East // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2016. - V. 14, № 10. - Pp. 2629 – 2642. - DOI: 10.1007/s10518-016-9911-x

Kuehn N. M., Scherbaum F. Ground-motion prediction model: A multilevel approach // Bulletin of Earthquake Engineering. - 2015. - V. 13, № 9. - Pp. 2481 – 2491. - DOI: 10.1007/s10518-015-9732-3

Kuk V. A procedure determined S1 and S2 earthquake acceleration with use of macroseismic data : Technical committee on earthquake ground motion and seismic evaluation of nuclear power plants organized by IAEA and held in Moscow, USSR, 24 - 28 March 1986. Working material. - Vienna, Austria, 1989. - Pp. 269 - 275.

Kumar D., Khattri K.N., Teotia S.S., Rai S.S. Modeling of accelerograms of two Himalayan earthquakes using a novel semi-empirical method and estimation of accelerograms for a hypothetical great earthquake in the Himalaya // Current Science. - 1999. - V. 76. - Pp. 819 - 830.

Kumar D., Teotia S.S., Khattri K.N. The representation of attenuation characteristics of strong ground motions observed in the 1986 Dharamsala and 1991 Uttarkashi earthquakes by available empirical relations // Current Science. - 1997. - V. 73. - Pp. 543 - 548.

Kyoshin Net CD-ROM, 1996 - 2002.

Landwehr N., Kuehn N.M., Scheffer T., Abrahamson N. A nonergodic ground-motion model for California with spatially varying coefficients // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2016. - V. 106, № 6. - Pp. 2574 - 2583. - DOI: 10.1785/0120160118

Lanzano G., D'Amico M., Felicetta C., Puglia R., Luzi L., Pacor F., Bindi D. Ground-motion prediction equations for region-specific probabilistic seismic-hazard

analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2016. - V. 106, № 1. - Pp. 73 - 92. - DOI: 10.1785/0120150096

Lanzano G., Salzano E., Santucci F., Fabbrocino G. Performance Assessment of Continuous Buried Pipelines under Earthquakes Loading // Chemical Engineering Transactions. - 2013. - V. 31. - Pp. 631 – 636. - DOI: 10.3303/CET1331106

Lasley S., Rodriguez-Marek A., Breen R.A. Number of Equivalent Stress Cycles for Liquefaction Evaluations in Active Tectonic and Stable Continental Regimes // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. - 2017. - V. 143, № 4. - Pp. 477 – 488. - DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001629

Lee V.W. Empirical scaling and regression methods for earthquake strong-motion response spectra – a review // ISET Journal of Earthquake. Technology. - 2007. - V. 44, № 1. - Pp. 39 – 69.

Lee V.W. Empirical scaling of strong earthquake ground motion - part I: Attenuation and scaling of response spectra // ISET Journal of Earthquake Technology. - 2002. – V. 39, № 4. - Pp. 219 – 254.

Lee V.W. Pseudo relative velocity spectra in former Yugoslavia // European Earthquake Engin. - 1995. - V. IX, № 1. - Pp. 12 – 22.

Lee V.W., Manić M. Empirical scaling of response spectra in former Yugoslavia // Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering (Vienna, August 28 – September 2, 1994). - Vienna, Austria, 1994. - V. 4. - Pp. 2567 – 2572.

Lee V.W., Manić M., Bulajić B., Herak D., Herak M., Stojković M., Trifunac M.D. Microzonation of Banja Luka for performance – based earthquake - resistant design // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2015. - V. 78. - Pp. 71 – 88. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.06.035

Lee V.W., Trifunac M.D. Pseudo relative velocity spectra of strong earthquake ground motion in California : technical report CE 95-04. - Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California, USA., 1995.

Lee V.W., Trifunac M.D., Todorovska M.I., Novikova E.I. Empirical Equations Describing Attenuation of the Peaks of Strong Ground Motion, in Terms of Magnitude, Distance, Path Effects, and Site Conditions : report CE 95-02. - Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, USA, 1995.

Lee W.H.K., Bennett R.E., Meagher K.L. A method of estimating magnitude of local earthquakes from signal duration : USGS open file report. - USGS, 1972. - Pp. 1 – 28.

Lee W.H.K., Shin T.C., Kuo K.W., Chen K.C. CWB Free-Field Strong-Motion Data from the 921 Chi-Chi Earthquake : CD. - Seismology Center, Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 1999.

Lee Y.-T., Ma K.-F., Wang Y.-J., Wen K.-L. An empirical equation of effective shaking duration for moderate to large earthquakes // Nat. Hazards. - 2015. - V. 75, № 2. - Pp. 1779 – 1793. - DOI: 10.1007/s11069-014-1398-7

Li B., Xie W.-C., Pandey M.D. Newmark design spectra considering earthquake magnitudes and site categories // Earthquake Engin. and Engin. Vibration. - 2016. - V. 15, № 3. - Pp. 519 – 535. - DOI: 10.1007/s11803-016-0341-1

Lin P.-S., Lee C.-T., Cheng C.-T., Sung C.-H. Response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes in Taiwan // Engineering Geology. - 2011. - V. 121, № 3 - 4. - Pp. 150 – 164. - DOI: 10.1016/j.enggeo.2011.04.019

Liu A., Stewart J. P., Abrahamson N., Morikawi Y. Equivalent number of uniform stress cycles for liquefaction analysis // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. - 2001. - V. 127, № 12. - Pp. 1017 – 1026. - DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:12(1017)

Lu, D., Cui, J., Li, X., Lian, W. Ground motion attenuation of  $M_S 8.0$  Wenchuan earthquake // Earthquake Science. - 2010. - V. 23, № 1. - Pp. 95 - 100. - DOI: 10.1007/s11589-009-0047-9

Lussou P., Bard P.Y., Cotton F., Fukushima Y. Seismic design regulation codes: contribution of K-Net data to site effect evaluation // Journal of Earthquake Engineering. - 2001. - V. 5, № 1. - Pp. 13 – 33. - DOI: 10.1080/13632460109350384

Malhotra P.K. Smooth Spectra of Horizontal and Vertical Ground Motions // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2006. - V. 96, № 2. - Pp. 506 – 518. - DOI: 10.1785/0120050062

Manafpour A.R. The Bam, Iran, earthquake of 26 December 2003. Field investigation report. - Halcrow, the UK Earthquake Engineering Field investigation Team, 2005. - 59 p.

Manić M.I. Empirical scaling of response spectra for the territory of north-western Balkan // Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering (London, September 9 – 13, 2002). - London, UK, 2002. - Paper No. 650.

Margaris B., Papazachos C., Papaioannou C., Theodulidis N., Kalogeras I., Skarlatoudis A. Ground motion attenuation relations for shallow earthquakes in Greece // Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering (London, September 9 – 13, 2002). - London, UK, 2002. - Paper No. 385

Marin S., Avouac J.-P., Nicolas M., Schlupp A. A probabilistic approach to seismic hazard in metropolitan France // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2004. - V. 94, № 6. - Pp. 2137 – 2163. - DOI: 10.1785/0120030232

Markušić S., Herak M., Herak D., Ivančić I. Peak horizontal-to-vertical acceleration ratio and local amplification of strong ground motion // Studia Geophysica et Geodaetica. - 2002. - V. 46, № 1. - Pp. 83 – 92. - DOI: 10.1023/A:1019889600531

Martin W.M.J., Haresh C.S. Determining strong-motion duration of earthquakes // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1979. - V. 69, № 4. - Pp. 1253 – 1265.

Massa M., Marzorati S., D'Alema E., Di Giacomo D., Augliera P. Site classification assessment for estimating empirical attenuation relationships for central-

northern Italy earthquakes // Journal of Earthquake Engineering. - 2007. - V. 11, № 6. - Pp. 943 – 967. - DOI: 10.1080/13632460701232675

Massa M., Morasca P., Moratto L., Marzorati S., Costa G., Spallarossa D. Empirical ground-motion prediction equations for northern Italy using weak- and strong-motion amplitudes, frequency content, and duration parameters // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2008. - V. 98, № 3. - Pp. 1319 - 1342. - DOI: 10.1785/0120070164

McGarr A., Fletcher J.B. Development of ground-motion prediction equations relevant to shallow mining-induced seismicity in the Trail Mountain area, Emery County, Utah // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2005. - V. 95, № 1. - Pp. 31 - 47. - DOI: 10.1785/0120040046

McGuire R.K. Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1995. - V. 85, № 5. - Pp. 1275 – 1284.

McGuire R.K. Seismic design spectra and mapping procedures using hazard analysis based directly on oscillator response // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1977. - V. 5, № 3. - Pp. 211 – 234. - DOI: 10.1002/eqe.4290050302

McGuire R.K. Seismic ground motion parameter relations // Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE. - 1978. - V. 104, № GT4. - Pp. 481 – 490.

McGuire R.K., Barnhard T.P. The usefulness of ground motion duration in predicting the severity of seismic shaking : preprint. - 1979. - 17 p.

McVerry G.H., Zhao J.X., Abrahamson N.A., Somerville P.G.. New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes // Bulletin of New Zealand Society for Earthquake Engineering. - 2006. - V. 39, № 4. - Pp. 1 – 58.

Midorikawa S. Semi empirical estimation of peak ground acceleration from large earthquakes // Tectonophysics. - 1993. - V. 218. - Pp. 287 – 295.

Mikhailova N.N., Aptikaev F.F. Some Correlation Relations between Parameters of Seismic Motions // Journal of Earthquake Prediction Research. - Moscow-Beijing, 1996. - V. 5, № 2. - Pp. 257 - 267.

Miyakoshi J., Hayashi Y., Tamura K., Fukuwa N. Damage ratio functions for buildings using damage data of the Hyogo-ken Nanbu earthquake // Proceedings of the 7th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR'97) (Kyoto, November 24 – 28, 1997). - Kyoto, Japan, 1998. - Pp. 349 – 362.

Mohammadnejad A. K., Mousavi S. M., Torabi M., Mousavi M., Alavi A.H. Robust attenuation relations for peak time-domain parameters of strong ground motions // Environmental Earth Sciences. - 2012. - V. 67, № 1. - Pp. 53 – 70. - DOI: 10.1007/s12665-011-1479-9

Mohraz B. A Study of Earthquake Response Spectra for Different Geological Conditions // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1976. - V. 66, № 3. - Pp. 915 – 935.

Mohraz B. Comments on Earthquake Response Spectra // Nuclear Engineering and Design. - 1978. - V. 45, № 2. - Pp. 489 – 495.

Mohraz B. Recent Studies of Earthquake Ground Motion and Amplification // Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (Madrid, July 19 - 24, 1992). - Madrid, Spain, 1992. - V. XI. - Pp. 6695 - 6704.

Molas G.L., Yamazaki F. Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1995. - V. 85, № 5. - Pp. 1343 – 1358.

Molas G.L., Yamazaki F. Attenuation of response spectra in Japan using new JMA records // Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center. - 1996. - V. 29.- Pp. 115 – 128.

Montalva G.A., Bastías N., Rodriguez-Marek A. Ground-motion prediction equation for the Chilean subduction zone // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2017. - V. 107, № 2. - Pp. 901 - 911. - DOI: 10.1785/ 0120160221

Morasca P., Zolezzi F., Spallarossa D., Luzi L. Ground motion models for the Molise region (southern Italy) // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2008. - V. 28, № 3. - Pp. 198 – 211. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.06.001

Morikawa N., Fujiwara H. A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to M9 mega-earthquake // *Journal of Disaster Research*. - 2013. - V. 8, № 5. - Pp. 878 – 888. - DOI: 10.20965/jdr.2013.p0878

Moss R.E. Reduced sigma of ground motion prediction equations through uncertainty propagation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2011. - V. 101, № 1. - Pp. 250 – 257. - DOI: 10.1785/0120090325

Murao O., Tanaka H., Yamazaki F. Risk evaluation method of building collapse from the experience of the Kobe earthquake // *Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 1 – 4, 2000)*. - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 2312.

Murphy J.R., O'Brien L.J. Analysis of a worldwide strong motion data sample to develop an improved correlation between peak acceleration, seismic intensity and other physical parameters. - U.S. Nuclear Regulatory Commission, Falls Church, USA, 1978. - 97 p.

Nakami A. Statistical evaluation of embedment effect on damage to building structures based on data from the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake // *Int. J. of GEOMATE*. - 2014. - V. 6, № 1 (Sl. № 11). - Pp. 824 - 831.

Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS) // *Proceedings of the IX World Conference on Earthquake Engineering (Tokyo – Kyoto, August 2 – 9, 1988)*. - Tokyo – Kyoto, Japan, 1988. - V. VII. - Pp. 673 – 678.

Nekooei M., Babaei H. Attenuation relationships for horizontal component of PGV derived from strongmotion records from Iran // *Journal of Measurements in Engineering*. - 2016. - V. 4, № 2. - Pp. 112 – 116.

Nersesov I.L., Aptikaev F.F. Urban Development in Relation to Earthquakes, Landslides, and Unstable Ground // *The Soviet-American Exchange in Earthquake*

Prediction : USGS Open-File Report 81-1150 / Spall H., Simpson D.W. (eds.) - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1981. - Pp. 1 - 11. DOI: 10.3133/ofr811150.

Neuman F. Damaging earthquake and blast vibrations // *The Trends in Engineering*. - 1958. - V. 10, № 1. - Pp. 4 – 10.

Neumann R. Earthquake intensity and related ground motion. - Seattle, Univ.Wash. Press, 1954. - 77 p.

Newmark N.M., Blume J.A., Kapur K.K. Seismic design spectra for nuclear power plants // *Journal of the Power Division ASCE*. - 1973. - V. 99, № PO2. - Pp. 287 – 303.

Newmark N.M., Hall W.J. Earthquake spectra and design. *Engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records*. - Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, USA, 1982. - 103 p.

NGA-East: Median ground-motion models for the central and eastern North America region : technical report 2015/04. - Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, 2015. - 321 p.

NGA-West2 ground motion prediction equations for vertical ground motions : technical report 2013/24. - Pacific Earthquake Engineering Research Center, Headquarters at the University of California, Berkeley, USA, 2013. - 186 p.

Nguyen L. M., Lin T.-L., Wu Y.-M., Huang B.-S., Chang C.-H., Huang W.-G., Le T. S., Nguyen Q.C., Dinh V.T. The first peak ground motion attenuation relationships for north of Vietnam // *Journal of Asian Earth Sciences*. - 2012. - V. 43, № 1. - Pp. 241 – 253. - DOI: 10.1016/j.jseaes.2011.09.012

Niazi M., Bozorgnia Y. Behaviour of near-source peak horizontal and vertical ground motions over SMART-1 array, Taiwan // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1991. - V. 81, № 3. - Pp. 715 – 732.

Niazi M., Bozorgnia Y. Behaviour of near-source vertical and horizontal response spectra at SMART-1 array, Taiwan // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 1992. - V. 21. - Pp. 37 – 50.

Novikova E.I., Todorovska M.I., Trifunac M.D. A Preliminary Study of the Duration of Strong Earthquake Ground Motion on the Territory of Former Yugoslavia : Dept. of Civil Eng. Report, CE 93-09. - Univ. of Southern California, Los Angeles, California; 1993.

Novikova E.I., Todorovska M.I., Trifunac M.D. Frequency dependent duration of strong earthquake ground motion on the territory of former Yugoslavia Part I: Magnitude models // *European Earthquake Engineering*. - 1995a. - V. VIII, № 3. - Pp. 11 – 25.

Novikova, E.I., Todorovska M.I., Trifunac M.D. Frequency dependent duration of strong earthquake ground motion on the territory of former Yugoslavia, Part II: Local intensity models // *European Earthquake Engineering*. - 1995b. - V. VIII, № 3. - Pp. 26 – 37.

Nuclear Safety. Technical Assessment Guide. [Электронный ресурс].- Office for Nuclear Regulation (ONR), UK, 2014. – URL: [http://www.onr.org.uk/operational/tech\\_asst\\_guides/index.htm](http://www.onr.org.uk/operational/tech_asst_guides/index.htm) (дата обращения 20.05.2019)

O'Rourke M.J., Ayala G. Pipeline damage due to wave propagation // *J. Geotech. Eng. ASCE*. - 1993. - V. 119, № 9. - Pp. 1490 – 1498.

O'Rourke T.D., Toprak S., Sano Y. Factors affecting water supply damage caused by the Northridge earthquake // *Proceedings of the 6th US National Conference on Earthquake Engin.* (Seattle, May 31 - June 4, 1998). - Seattle, USA, 1998. - Pp. 1 - 12.

Olson E.L., Allen R.M. The deterministic nature of earthquake rupture // *Nature*. - 2005. - V. 438, № 10. - Pp. 212 – 215. - DOI: 10.1038/nature04214

Orense R.P. Assessment of liquefaction potential based on peak ground motion parameters // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2005. - V. 25, № 3. - Pp. 225 – 240. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.10.013

Pankow K. L., Pechmann J.C. Erratum: The SEA99 ground-motion predictive relations for extensional tectonic regimes: Revisions and a new peak ground velocity relation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2006. - V. 96, № 1. - P. 364. - DOI: 10.1785/0120050184

Pankow K. L., Pechmann J.C. The SEA99 ground-motion predictive relations for extensional tectonic regimes: Revisions and a new peak ground velocity relation // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2004. - V. 94, № 1. - Pp. 341 – 348. - DOI: 10.1785/0120030010

Papageorgiou A.S., Aki K. A Specific Barrier Model for the Quantitative Description of Inhomogeneous Faulting and the Prediction of Strong Ground Motion. Part II. Applications of the Model // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1983. - V. 73, № 4. - Pp. 953 – 978.

Pavlenko O.V., Irikura K. Estimation of nonlinear timedependent soil behavior in strong ground motion on vertical array data // *Pure and Applied Geophysics*. - 2003. - V. 160, № 12, - Pp. 2365 - 2379.- DOI: 10.1007/s00024-003-2398-9

Pitilakis K., Gazepis C., Anastasiadis A. Design response spectra and soil classification for seismic code provisions // *XIII World Conference on Earthquake Engineering (Vancouver, August 1-6, 2004)*. - Vancouver, Canada, 2004. - Paper No. 2904.

Pitilakis K., Riga E., Anastasiadis A. New design spectra in Eurocode 8 and preliminary application to the seismic risk of Thessaloniki, Greece // *Perspectives on Earthquake Geotechnical Engineering (In honour of Prof. Kenji Ishihara)* / Editors Ansal A., Sakr M. : Part of the Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering book series (GGEE). - V. 37. - Springer, Cham. International Publishing Switzerland, 2015. - Pp. 45 - 91. - DOI: 10.1007/978-3-319-10786-8

Porcella R.L., Etheredge E.C., Maley R.P., Switzer J.C., Acosta A.V, Forshee R.D., Johnson D., Nielson J., Salsman M.J. Strong-motion data from the Superstition Hills earthquake of 0154 and 1315 (GMT), November 24, 1987 : Open-file report 87 - 672. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1987. - 56 p. - DOI: 10.3133/ofr87672

Pousse G., Berge-Thierry C., Bonilla L.F., Bard P.-Y. Eurocode 8 design response spectra evaluation using the K-Net Japanese database // Journal of Earthquake Engineering. - 2005. - V. 9, № 4. - Pp. 547 – 574. - DOI: 10.1142/S1363246905002067

Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. Displacement-Based Seismic Design of Structures. - IUSS Press, Pavia, Italy, 2007. - 721 p.

Rathje E.M., Abrahamson N., Bray J.D. Simplified Frequency Content Estimates of Earthquake Ground Motions // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. - 1998. - V. 124, № 2. - Pp. 150 - 159.

Rathje E.M., Faraj F., Russell S., Bray J.D. Empirical Relationships for Frequency Content Parameters of Earthquake Ground Motions // Earthquake Spectra. - 2004. - V. 20, № 1. - Pp. 119 - 144. - DOI: 10.1193/1.1643356

Rauch A.F., Martin J.R. EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. - 2000. - V. 126, № 4. - Pp. 360 – 371. - DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:4(360)

Roumelioti Z., Beresnev I.A. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: application to rock and soil sites with implications for nonlinear site response // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2003. - V. 93, № 4. - Pp. 1691 – 1702. - DOI: 10.1785/0120020218

Rowshandel B. Incorporating source rupture characteristics into ground-motion hazard analysis models // Seismological Research Letters. - 2006. - V. 77, № 6. - Pp. 708 – 722. - DOI:10.1785/gssrl.77.6.708

Rupakhety R., Sigurdsson S.U., Papageorgiou A.S., Sigbjörnsson R. Quantification of ground-motion parameters and response spectra in the near-fault

region // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2011. - V. 9, № 4. - Pp. 893 - 930. - DOI: 10.1007/s10518-011-9255-5

Sabetta F., Pugliese A. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1987. - V. 77, № 5. - Pp. 1491 – 1513.

Sabetta F., Pugliese A. Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1996. - V. 86, № 2. - Pp. 337 - 352.

Sadigh K., Chang C.-Y., Egan J.A., Makdisi F., Youngs R.R. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data // *Seismological Research Letters*. - 1997. - V. 68, № 1. - Pp. 180 – 189. DOI: 10.1785/gssrl.68.1.180

Sakurai T., Shoji G., Takahashi K., Nakamura T. Damage Assessment on Road Structures due to Slope Failures in the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake // *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake (Tokyo, March 1 - 4, 2012)*. - Tokyo, Japan, 2012. - Pp. 961 - 972.

Sandi H., Aptikaev F., Borcia I.S., Erteleva O., Alcaz V. Quantification of seismic action on structures. - Bucharest: AGIR Publishing House, 2010. - 216 p.

Sarma, S.K., Srbulov, M. A uniform estimation of some basic ground motion parameters // *Journal of Earthquake Engineering*. - 1998. - V. 2, № 2. - Pp. 267 – 287.

Schmidt V., Dahle A., Bungum H. Reduction of Natural Disasters in central America Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation. Phase II: 1996 - 2000. Part 2. Costa Rican spectral strong motion attenuation: technical report. - NORSAR, Kjeller, Norway, 1997.

Sedaghati F., Pezeshk S. Comparative study on parameter estimation method for attenuation relationships // *Journal of Geophysics and Engineering*. - 2016. - V. 13, № 6. - Pp. 912 - 927. - DOI: 10.1088/1742-2132/13/6/912

Sedaghati F., Pezeshk S. Partially nonergodic empirical ground-motion models for predicting horizontal and vertical PGV, PGA, and 5% damped linear acceleration response spectra using data from the Iranian plateau // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2017. - V. 107, № 2. - Pp. 934 - 948. - DOI: 10.1785/0120160205

Seekins L.C., Brady A.G., Carpenter C., Brown N. Digitized Strong-Motion Accelerograms of North and Central American Earthquakes 1933-1986. - U.S. Geological survey digital data series DDS-7, 1992.

Seismic engineering program report, ...1974 – 1980 // Geological survey circular. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1974 – 1983 yrs.

Seismic fragility formulations for water systems. Pt. 1, 2. American Lifelines Association (ALA). – 2001.- 343 p.

Seismic Guidelines for Water Pipelines. American Lifelines Association (ALA). – 2005. – 265 p.

Seismological Research Letters. - 1997. - V. 68, № 1. - 255 p. - DOI: 10.1785/gssrl.68.1.3

Selecting seismic parameters for large dams. Guidelines. Revision // ICOLD Bulletin. - 2010. - V. 72. - 37 p.

Shabestari K.T., Yamazaki F. Attenuation relation of response spectra in Japan considering site-specific term // Proceedings of the XII World Conference on Earthquake Engineering (Auckland, January 30 - February 4, 2000). - Auckland, New Zealand, 2000. - Paper No. 1432.

Shabestari T. K., Yamazaki F. Attenuation of JMA seismic intensity using recent JMA records // Proceedings of the 10th Japan Earthquake Engineering Symposium. -1998. - V. 1. - Pp. 529 – 534.

Shahidzadeh M.S., Yazdani A. A Bayesian updating applied to earthquake ground-motion prediction equations for Iran // Journal of Earthquake Engineering. - 2017. - V. 21, № 2. - Pp. 290 – 324. - DOI: 10.1080/13632469.2016.1158754

Sharma M.L., Douglas J., Bungum H. Kotadia J. Ground-motion prediction equations based on data from the Himalayan and Zagros regions // *Journal of Earthquake Engineering*. - 2009. - V. 13, № 8. - Pp. 1191 – 1210. - DOI: 10.1080/13632460902859151

Shoji Y., Tanii K., Kamiyama M. A study on the duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2005. - V. 25, № 7 – 10. - Pp. 505 – 512. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.11.033

Shoushtari A.V., Adnan A.B., Zare M. On the selection of ground motion attenuation relations for seismic hazard assessment of the Peninsular Malaysia region due to distant Sumatran subduction intraslab earthquakes // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2016. - V. 82. - Pp. 123 - 137. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.11.012

Silva W. J., Youngs, R.R., Idriss, I.M. Development of design response spectral shapes for Central and Eastern U. S. (CEUS) and Western U. S. (WUS) rock site conditions // *Proceedings of the Organization for Economic Coordination and Development of the Nuclear Energy Agency (OECE-NEA) Workshop on Engineering Characterization of Seismic Input (Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, November 15 – 17, 1999)*. NEA/CSNI/R(2000)2. - 2001. - V. 1. - Pp. 185 – 268.

Skarlatoudis A.A., Papazachos C.B., Margaris B.N., Ventouzi C., Kalogeras I. and the EGELADOS Group. Ground-motion prediction equations of intermediate-depth earthquakes in the Hellenic Arc, southern Aegean subduction area // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2013. - V. 103, № 3. - Pp. 1952 - 1968. - DOI: 10.1785/0120120265

Smit P., Arzoumanian V., Javakhishvili Z., Arefiev S., Mayer-Rosa D., Balassanian S., Chelidze T. The digital accelerograph network in the Caucasus // *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. Advances in Natural and Technological Hazards Research / Balassanian S., Cisternas A., Melkumyan M. (eds.)* -

Springer, Dordrecht, 2000. - V. 12. - Pp. 109 – 118. - DOI: 10.1007/978-94-015-9544-5\_12

Soghrat M.R., Ziyaeifar M. Ground motion prediction equations for horizontal and vertical components of acceleration in northern Iran // *Journal of Seismology*. - 2017. - V. 21, № 1. - Pp. 99 - 125. - DOI: 10.1007/s10950-016-9586-4

Sokolov V., Bonjer K.-P., Wenzel F. Accounting for site effect in probabilistic assessment of seismic hazard for Romania and Bucharest: a case of deep seismicity in Vrancea zone // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2004. - V. 24. - Pp. 929 – 947. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.06.021

Somerville P., Smith N.F., Graves R.W., Abrahamson N. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity // *Seismological Research Letters*. - 1997. - V. 68, № 1. - Pp. 199 – 222. - DOI: 10.1785/gssrl.68.1.199

Spudich P., Boore D.M. Erratum: SEA99: A revised ground-motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2005. - V. 95, № 3. - Pp. 1209. - DOI: 10.1785/0120050026

Spudich P., Fletcher J., Hellweg M., Boatwright J., Sullivan C., Joyner W.B., Hanks T.C., Boore D.M., McGarr A.F., Baker L.M., Lindh A.G. Earthquake ground motions in extensional tectonic regimes: USGS Open-File Report 96-292. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1996. - 351 p. - DOI: 10.3133/ofr96292

Spudich P., Fletcher J., Hellweg M., Boatwright J., Sullivan C., Joyner W.B., Hanks T.C., Boore D.M., McGarr A.F., Baker L.M., Lindh A.G. SEA96 - a new predictive relation for earthquake ground motions in extensional tectonic regimes // *Seismological Research Letters*. - 1997. - V. 68, № 1. - Pp. 190 – 198. - DOI: 10.1785/gssrl.68.1.190

Spudich P., Joyner W.B., Lindh A.G., Boore D.M., Margaris B. M., Fletcher J.B. SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic

regimes // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1999. - V. 89, № 5. - Pp.: 1156 - 1170

SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations : IAEA Safety Standards Series, STI/PUB/1448. - Vienna, 2010. - 80 p.

Stafford P.J. Conditional prediction of absolute durations // Bulletin of the Seismological Society of America. - 2008. - V. 98, № 3. - Pp. 1588 – 1594. - DOI: 10.1785/0120070207

Stafford P.J., Berrill J.B., Pettinga J.R. New predictive equations for Arias intensity from crustal earthquakes in New Zealand // Journal of Seismology. - 2009. - V. 13, № 1. - Pp. 31 - 52. - DOI: 10.1007/s10950-008-9114-2

Standard USNRC R.G. 1.60. Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. [Электронный ресурс] - Washington: USNRC, 2014. - 13 p. - URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1321/ML13210A432.pdf> (дата обращения 20.05.2019)

Stewart J.P., Boore D.M., Seyhan E., Atkinson G.M. NGA-West 2 equations for predicting vertical component PGA, PGV, and 5%-damped PSA from shallow crustal earthquakes // Earthquake Spectra. - 2016. - V. 32, № 2. - Pp. 1005 - 1031. - DOI: 10.1193/072114EQS116M

Stewart J.P., Douglas J., Javanbarg M.B., Di Alessandro C., Bozorgnia Y., Abrahamson N.A., Boore D.M., Campbell K.W., Delavaud E., Erdik M., Stafford P.J. GEM-PEER Task 3 Project: Selection of a Global Set of Ground Motion Prediction: PEER Report 2013/22. - PEER Center, University of California, Berkeley, 2013. - 251 p.

Strong motion earthquake accelerograms, digitization and analysis, 1971 records: USGS Open-File Report 76-609. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1976. - 135 p. - DOI: 10.3133/ofr76609

Strong motion earthquake accelerograms: report EERL - CIT. - Pasadena, USA, 1971 - 1975 yrs. - V. II, pt. A - Y.

Strong Motion Earthquake Records in Japan: Publ. Nat. Res. Center for Disaster Prev. Sci. and Techn. Agency. - Tokyo, Japan, 1960 - 1993 yrs. - V. 1 - 34.

Strong-motion accelerograms. - Univ. "Kirill and Methodij", Skopje, Yugoslavia, 1976 – 1977 yrs. - Publications 54 – 57.

Strong-Motion Data from Japanese Earthquakes: report SE-29. - World Data Center A, Boulder Colorado, 1981. - 341 p.

Strong-motion earthquake accelerograms. Digitized and plotted data. Uncorrected accelerograms. - V. 1, pt. 6. - Rome: Commissione CNEN – ENEL per la studio dei problemi sismici connessi con la realizzazione di impianti nucleari, 1980. – 472 p.

Strong-motion program report, ...1981 – 1985 // Geological survey circular. – Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1983 – 1989 yrs.

Study of strong motion instrument locations in Northern California. - EERI, 1971.

Suetomi I., Ishida E., Ioyama R., Goto Y. Amplification factor of peak ground motion using average shear wave velocity of shallow soil deposits // XIII World Conference on Earthquake Engineering (Vancouver, August 1 - 6, 2004). - Vancouver, Canada, 2004. - Paper No. 448.

Switzer J., Johnson D., Maley R., Matthiesen R. Western hemisphere strong-motion accelerograph station list, 1980: USGS Open-File Report 81-664. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1981. - 169 p. - DOI: 10.3133/ofr81664

Talebian M., Fielding E.J., Funning G.J., Ghorashi M., Jackson J., Nazari H., Parsons B., Priestley K., Rosen P.A., Walker R., Wright T.J. The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault // Geophysical Research Letters. - 2004. - V. 31, № 11. - L11611. - DOI: 10.1029/2004GL020058

The dynamic characteristics of faulting inferred from recordings of strong ground motion // Proc. Workshop XVI (October 21 - 23, 1981) / Boatwright J. (ed.):

USGS Open-File Report 82 - 591. - Menlo Park: U.S. Geological Survey, 1982. - 976 p.  
- DOI: 10.3133/ofr82591

Todorovska M.I., Trifunac M. D. Distribution of Pseudo Spectral Velocity during the Northridge, California earthquake of 17 January 1994 // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 1997. - V. 16. - Pp. 173 – 192. - DOI: 10.1016/S0267-7261(96)00045-0

Todorovska M.I., Trifunac M.D. Hazard Mapping of Normalized Peak Strain in Soil During Earthquakes: Microzonation of a Metropolitan Area // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 1996. - V. 15, № 5. - Pp. 321 - 329. - DOI: 10.1016/0267-7261(96)00006-1

Toro G.R., Abrahamson N.A., Schneider J.F. Model of strong ground motions from earthquakes in Central and Eastern North America: best estimates and uncertainties // Seismological Research Letters. - 1997. - V. 68, № 1. - Pp. 41 - 57. - DOI: 10.1785/gssrl.68.1.41

Trifunac M. D., Brady A.G. Correlations of peak acceleration, velocity and displacement with earthquake magnitude, distance and site conditions // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 1976. - V. 4, № 5. - Pp. 455 – 471.

Trifunac M.D, Novikova E.I. Duration of earthquake fault motion in California // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. - 1995. - V. 24, № 6. - Pp. 781 – 799.

Trifunac M.D. 70-th anniversary of Biot spectrrrum. 23rd ISET Annual Lecture // ISET Journal of Earthquake. Technology. - 2003. - V. 40, № 1. - Paper No. 431 - Pp. 19 – 50.

Trifunac M.D. Broad Band Extension of Fourier Amplitude Spectra of Strong Motion Acceleration: report CE 93-01. - University of Southern California, Los Angeles, USA, 1993b.

Trifunac M.D. Effects of site geology on amplitudes of strong motion // Proceedings of the VII World Conference on Earthquake Engineering (Istanbul, September 8 – 13, 1980). - Istanbul, Turkey, 1980. - V. 2. - Pp. 145 – 152.

Trifunac M.D. Long Period Fourier Amplitude Spectra of Strong Motion Acceleration // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 1993a. - V. 12, № 6. - Pp. 363 – 382. - DOI: 10.1016/0267-7261(93)90039-T

Trifunac M.D. Preliminary analysis of the peaks strong earthquake ground motion-dependence of peaks on earthquake magnitude, epicentral distance, and recording site conditions // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1976. - V. 66, № 1. - Pp. 189 - 219.

Trifunac M.D. Uniformly processed strong earthquake ground acceleration in the Western United States of America for the period from 1933 to 1971: pseudo relation velocity spectra and processing noise: report No. 77 - 04. - Los Angeles, UCLA, 1977. - 219 p.

Trifunac M.D., Brady A.G. A study of the duration of strong earthquake ground motion // Bulletin of the Seismological Society of America. - 1975. - V. 65, № 3. - Pp. 581 – 626.

Trifunac M.D., Ivanović S.S. Reoccurrence of Site Specific Response in Former Yugoslavia – Part II: Friuli, Banja Luka and Kopaonik // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2003b. - V. 23, № 8. - Pp. 663 - 681. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2003.07.002

Trifunac M.D., Ivanović S.S. Reoccurrence of Site Specific Response in Former Yugoslavia – Part I: Montenegro // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2003a. - V. 23, № 8. - Pp. 637 - 661. - DOI: 10.1016/j.soildyn.2003.07.001

Trifunac M.D., Todorovska M.I. Can aftershock studies predict site amplification? Northridge, CA, earthquake of 17 January 1994 // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. - 2000a. - V. 19, № 4. - Pp. 233 - 251. - DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00011-7

Trifunac M.D., Todorovska M.I. Long period microtremors, microseisms and earthquake damage: Northridge, CA, earthquake of 17 January 1994 // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 2000b. - V. 19, № 4. - Pp. 253 - 267. - DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00013-0

Trombetti T., Silvestri S., Gasparini G., Righi M., Ceccoli C. Correlations between the displacement response spectra and the parameters characterizing the magnitude of the ground motion // *Proceedings of the XIV World Conference on Earthquake Engineering (Beijing, October 12 – 17, 2008)*. - Beijing, China, 2008. - CD. - Paper ID 02-0130.

Tso W.K., Zhu T.J., Heidebrecht A.C. Engineering implication of ground motion A/V ratios // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. - 1992. - V. 11, № 3. - Pp. 133 – 144. - DOI: 10.1016/0267-7261(92)90027-B

Tusa G., Langer H. Prediction of ground motion parameters for the volcanic area of Mount Etna // *Journal of Seismology*. - 2016. - V. 20, № 1. - Pp. 1 - 42. - DOI: 10.1007/s10950-015-9508-x

Vacareanu R., Demetriu S., Lungu D., Pavel F., Arion C., Iancovici M., Aldea A., Neagu C. Empirical ground motion model for Vrancea intermediate-depth seismic source // *Earthquakes and Structures*. - 2014a. - V. 6, № 2. - Pp. 141 - 161. - DOI: 10.12989/eas.2014.6.2.141

Vacareanu R., Marmureanu G., Pavel F., Neagu C., Cioflan C.O., Aldea A. Analysis of soil factor S using strong ground motions from Vrancea subcrustal seismic source // *Romanian Reports in Physics*. - 2014b. - V. 66, № 3. - Pp. 893 – 906.

Vacareanu R., Radulian M., Iancovici M., Pavel F., Neagu C. Fore-arc and back-arc ground motion prediction model for Vrancea intermediate depth seismic source // *Journal of Earthquake Engineering*. - 2015. - V. 19, № 3. - Pp. 535 - 562. - DOI: 10.1080/13632469.2014.990653

Vanmarke E.H., Lai Sh.-Sh.P. Strong motion duration and RMS amplitude of earthquake records // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1980. - V. 70, № 4. - Pp. 1293 - 1307.

Villalobos-Escobar G.P., Castro R.R. Empirical ground-motion relations using moderate earthquakes recorded in Medellín-Aburrá valley (Colombia) strong-motion networks // *Bulletin of Earthquake Engineering*. - 2013. - V. 11, № 4. - Pp. 863 - 884. - DOI: 10.1007/s10518-012-9408-1

Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and Modified Mercalli intensity in California // *Earthquake Spectra*. - 1999. - V. 15, № 3. - Pp. 557 – 564. - DOI: 10.1193/1.1586058

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 1994. - V. 84, № 4. - Pp. 974 - 1002.

Westeremo B.D., Trifunac M.D., Anderson J.G. and M. Dravinski Seismic risk tables for pseudo relative velocity spectra in regions with shallow seismicity: report CE № 80 – 01. - Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, California, USA., 1980.

Wolfe C.J. On the Properties of Predominant-Period Estimators for Earthquake Early Warning // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2006. - V. 96, № 5. - Pp. 1961 – 1965. – DOI: 10.1785/0120060017

Wu Y.-M., Kanamori H. Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2005. - V. 95, № 3. - Pp. 1181 – 1185. - DOI: 10.1785/0120040193

Xu L.J., Zhao G.C., Liu Q.Y., Xie W.J., Xie L.L. Consecutive Combined Response Spectrum // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. - 2014. - V. 13, № 4. - Pp. 623 – 636. - DOI: 10.1007/s11803-014-0268-3

Yamada M., Olsen A., Heaton T. Statistical features of short- and long-period near-source ground motion // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2009. - V. 99, № 6. - Pp. 3264 - 3274. - DOI: 10.1785/0120090067

Yamaguchi N., Yamazaki K., Ikegami R. The Relationship between Predominant Period and the Magnitude for the Earthquakes, which occurred in and near the Kwantō District // *Zisin* (Journal of Seismological Society of Japan. 2nd ser.). - 1978. - V. 31, № 2. - Pp. 207 - 227. - DOI: 10.4294/zisin1948.31.2\_207

Yang D., Yang K., Chen G. Recent advances in engineering characteristics of near - fault ground motions and seismic effects of building structures // *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)* (Brisbane, December 9 - 11, 2015). - Brisbane, QLD, Australia, 2015. - P. 1296 – 1305.

Yang D.X., Wang, W. Nonlocal period parameters of frequency content characterization for nearfault ground motions // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. - 2012. - V. 41, № 13. - Pp. 1793 – 1811. - DOI: 10.1002/eqe.2157

Youngs R.R., Day S.M., Stevens J.L. Near field ground motions on rock for large subduction earthquakes // *Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference: Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1988. - V. II. - Pp. 445 - 462.

Zamora M., Riddell R. Elastic and Inelastic Response Spectra Considering Near-Fault Effects // *Journal of Earthquake Engineering*. - 2011. - V. 15, № 5. - Pp. 775 – 808. - DOI: 10.1080/13632469.2011.555058

Zhao J. X., Liang X., Jiang F., Xing H., Zhu M., Hou R., Zhang Y., Lan X., Rhoades D.A., Irikura K., Fukushima Y., Somerville P. G. Ground-motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2016b. - V. 106, № 4. - Pp. 1518 - 1534. - DOI: 10.1785/0120150034

Zhao J.X., Jiang F., Shi P., Xing H., Huang H., Hou R., Zhang Y., Yu P., Lan X., Rhoades D.A., Somerville P.G., Irikura K., Fukushima Y. Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2016a. - V. 106, № 4. - Pp. 1535 - 1551. - DOI: 10.1785/0120150056

Zhao J.X., Zhou S., Gao P., Long T., Zhang Y., Thio H. K., Lu M., Rhoades D.A. An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness of fit for ground-motion prediction equations // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2015. - V. 105, № 5. - Pp. 2750 – 2763. - DOI: 10.1785/0120150013

Zhao J.X., Zhou S., Zhou J., Zhao C., Zhang H., Zhang Y., Gao P., Lan X., Rhoades D.A., Fukushima Y., Somerville P. G., Irikura K. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. - 2016c. - V. 106, № 4. - Pp. 1552 – 1569. - DOI: 10.1785/0120150063

Zonno G., Montaldo V. Analysis of strong ground motions to evaluate regional attenuation relationships // *Annals of Geophysics (Annali di geofisica)*. - 2002. - V. 45, № 3 - 4. - Pp. 439 – 454. - DOI: 10.4401/ag-3518

Zuccolo E., Bozzoni F., Lai C. G. Regional low-magnitude GMPE to estimate spectral accelerations for earthquake early warning applications in southern Italy // *Seismological Research Letters*. - 2017. - V. 88, № 1. - Pp. 61 – 71. - DOI: 10.1785/0220160038