

На правах рукописи

Брыжак

БРЫЖАК Евгений Вадимович

**ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИЛЬНЫХ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ
РИФТОВОЙ ЗОНЫ**

Специальность 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков
полезных ископаемых

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
геолого-минералогических наук

ИРКУТСК – 2014 г.

Работа выполнена в лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмологии федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земной коры Сибирского отделения РАН

Научный руководитель:

Джурик Василий Ионович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмологии института земной коры Сибирского отделения РАН

Официальные оппоненты:

Иванов Федор Илларионович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной алгебры и защиты информации Института математики, экономики и информатики Иркутского государственного университета

Мироманов Андрей Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой технологии геологической разведки Иркутского государственного технического университета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения РАН, г. Улан-Удэ

Защита состоится «23» сентября 2014 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.01 при Иркутском государственном техническом университете по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрГТУ, ауд. Е-301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Иркутского государственного технического университета и на сайте <http://www.istu.edu/structure/54/4393/>.

Отзывы на диссертацию и автореферат должны представляться в диссертационный совет не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, наименование организации и должность в этой организации. Отзыв в 2 экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять ученому секретарю совета Галине Дмитриевне Мальцевой по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрГТУ, диссовет Д 212.073.01 (тел. 89149323049, e-mail: dis@istu.edu).

Автореферат разослан «11» августа 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Кандидат геолого-минералогических наук



Мальцева Г. Д.

Введение

Актуальность проблемы. Сейсмические воздействия (амплитуды, длительность, спектральный состав и другие параметры акселерограмм и их спектров) характеризуют колебательное движение грунта при землетрясениях и поэтому являются основой при количественном сейсмическом районировании различной степени детальности. Очевидно, что в первую очередь для их оценки для каждого региона важно знать спектральный состав колебаний тех или иных грунтов при сильных землетрясениях. Однако относительная редкость возникновения последних и отсутствие на сегодняшний день местной инженерно-сейсмологической сети станций, необходимой для мониторинга различных кинематических элементов движений почвы при относительно сильных землетрясениях на различных по составу и состоянию грунтах, служащих основаниями сооружений, значительно усложняют эту задачу.

Целью настоящей работы является рассмотрение сейсмических воздействий и их возможное прогнозирование для Байкальской рифтовой зоны. При этом необходимо получить не только спектры ускорений колебаний грунта при сильных землетрясениях, но и сами прогнозные акселерограммы, позволяющие оценить параметры сейсмических воздействий (амплитуды, длительность, спектральный состав и др.).

Основные задачи исследований:

1. Анализ основных методов, позволяющих учесть влияние грунтовых условий на записи землетрясений на сейсмических станциях и сейсмические воздействия на здания и сооружения.
2. Разработка программ по повышению эффективности расчётных методов учёта влияния грунтовых условий и других вспомогательных программ.
3. Анализ основных параметров сильных движений грунта в Байкальской рифтовой зоне за последние десять лет.
4. Получение эмпирических зависимостей основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта от магнитуды и расстояния.
5. Реализация прогноза записей акселерограмм для различных эпицентральных расстояний, магнитуд и сейсмических воздействий для конкретных территорий БРЗ на случай сильных землетрясений.

Личный вклад и фактический материал. Исходными материалами в работе послужили инженерно-геофизические изыскания, проведённые на сейсмических станциях Прибайкалья и отдельных площадках в пределах Байкальской рифтовой зоны лабораторией инженерной сейсмологии и сейсмогеологии института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН). Автор лично принимал участие во многих исследованиях, как на стадии измерений, так и на стадии интерпретации полученных геофизических параметров. Были выполнены следующие виды работ: сейсморазведка методом преломленных волн, электроразведка методами вертикального электрического зондирования, запись микросейсмоколебаний. Получен очень большой фактический материал. Также были использованы записи акселерограмм относительно сильных землетрясений сейсмическими станциями Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН (БФ ГС СО РАН), произведенных в течение 1999–2012 годов.

Защищаемые положения:

1. Выбранный комплекс методов (инструментальных и расчетных) и разработанный пакет вспомогательных программ позволяет получить амплитудно-частотные и спектральные характеристики верхней зоны разреза, которые необходимы для оценки сейсмических воздействий сильных землетрясений.

2. Установленные эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта при землетрясениях от магнитуды и расстояния дают возможность реализовать прогноз акселерограмм сильных землетрясений для конкретных территорий Байкальской рифтовой зоны.

3. Разработанная методика формирования исходного сейсмического сигнала с учетом основных параметров зон возникновения очагов землетрясений является основой получения количественных характеристик сейсмических воздействий на здания и сооружения при районировании сейсмической опасности различной степени детальности. Это положение реализовано на примере конкретной строительной площадки.

Научная новизна работы. В настоящей работе предложен способ повышения эффективности расчетных методов оценки влияния грунтовых условий на сейсмический сигнал и разработано соответствующее программное обеспечение. Впервые для сейсмических станций Прибайкалья определены частотные характеристики верхней толщи разреза. Приведены основные параметры сильных движений грунта в Байкальской рифтовой зоне за последние десять лет. Получены эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений грунта от магнитуды и расстояния. Показана возможность прогноза записей акселерограмм для различных эпицентральных расстояний и магнитуд. На основе этого прогноза по имеющимся экспериментальным записям ускорений для некоторых территорий Байкальской рифтовой зоны рассчитаны средние амплитудные спектры, которые приведены к потенциально возможным магнитудам зон возникновения очагов землетрясений. Из этих спектров формируется исходный сейсмический сигнал, используемый для количественной оценки сейсмической опасности.

Практическая значимость. В приведенной методике формирования исходного сейсмического сигнала были использованы основные параметры сильных движений грунта в Байкальской рифтовой зоне за последние десять лет. Сформированный исходный сейсмический сигнал на примере г. Иркутска учитывает основные параметры зон ВОЗ и полученные эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений грунта от магнитуды и расстояния, которые позволяют прогнозировать записи акселерограмм для различных эпицентральных расстояний и магнитуд. Таким образом, он является наиболее обоснованным для территории г. Иркутска и иркутской агломерации. В работе показана возможность использования полученного исходного сигнала и проведены теоретические расчеты для сейсмогрунтовых моделей, характеризующих вероятностные модели эталона для коренных пород (грунтов 1-й категории), средних грунтов (2-й категории) и водонасыщенных грунтов. Получены оценки сейсмических воздействий для зоны с исходной сейсмичностью 8 баллов, и используя модели эталона, для 9-балльной зоны с различной по мощности грунтовой толщей водонасыщенных и неводонасыщенных грунтов. Безусловно, что полученные результаты могут уточняться в дальнейшем, но уже сейчас их можно

использовать при планировании возможного строительства на территории иркутской агломерации.

Апробация работы и публикации. Основные результаты и отдельные методические разработки диссертации докладывались на IV международной научно-практической конференции «Геокриологические проблемы Забайкалья и сопредельных территорий» (Чита, 2010 г.), на 4-й конференции геокриологов России (Москва, 2011 г.), на XXIV Всероссийской молодёжной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (Иркутск, 2011 г.), на IX Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике (Иркутск, 2011 г.), на Всероссийском совещании «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследования на количественной основе» (Иркутск, 2012 г.), на 9-й Генеральной ассамблее Азиатской сейсмологической комиссии (Улан-Батор, Монголия, 2012 г.), на Генеральной Ассамблее Европейского союза геонаук (Вена, Австрия, 2013 г.), на IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии» (Улан-Удэ, 2013 г.)

По теме диссертации опубликовано 33 работы, 8 из них в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из трёх глав, введения, заключения и приложения общим объёмом 172 стр. машинописного текста, 19 таблиц, 51 рисунка, библиографии 147 наименований.

Автор выражает искреннюю благодарность и признательность своему научному руководителю доктору геолого-минералогических наук В.И. Джурику за оказанную помощь и поддержку при выполнении диссертационной работы. Автор признателен и благодарит кандидатов наук А.Ф. Дреннова, С.П. Серебренникова, А.Ю. Ескина, Л.А. Усынина, сотрудников лаборатории инженерной сейсмологии и сейсмогеологии Н.Н. Дреннову, В.С. Баскакова, А.Н. Шагуна за консультации и практическую помощь на разных стадиях работы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, приведены научная новизна и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава целиком посвящена сравнительному анализу результатов расчетных методов оценки влияния грунтовых условий на сейсмический сигнал, т.к. они используются в последующих главах для получения амплитудно-частотных характеристик верхней зоны разреза. Предложен способ повышения эффективности этих методов и описан комплекс вспомогательных программ, разработанных автором для решения поставленных в работе задач.

Во второй главе исследованы амплитудно-частотные характеристики верхней толщи разреза всех постоянных сейсмических станций Прибайкалья и Забайкалья. Приведены основные параметры сильных движений грунта в Байкальской рифтовой зоне за последние десять лет. Получены эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта от магнитуды и расстояния. Показана возможность прогноза записей акселерограмм для различных эпицентральных расстояний и магнитуд. Кроме того,

найлены средние спектры, характеризующие амплитудно-частотный состав сильных землетрясений юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны.

В третьей главе сделан обзор существующих методик, позволяющих сформировать сейсмический сигнал, который соответствует по своим параметрам исходной сейсмичности территории. Также предложена методика, основывающаяся на полученных во второй главе эмпирических зависимостях и средних спектрах, полученных для каждой зоны возникновения очагов землетрясений. Сформирован исходный сейсмический сигнал для территории г. Иркутска и иркутской агломерации и проведены теоретические расчёты для сейсмогрунтовых моделей различного состояния. Приведён пример использования предложенной методики при комплексной оценке сейсмической опасности конкретной строительной площадки.

В заключении обобщены основные результаты, полученные в работе, сформулированы выводы и рекомендации.

Защищаемые положения

1. Выбранный комплекс методов (инструментальных и расчетных) и разработанный пакет вспомогательных программ позволяет получить амплитудно-частотные и спектральные характеристики верхней зоны разреза, которые необходимы для оценки сейсмических воздействий сильных землетрясений.

Расчетные методы как наиболее оперативные и менее трудоемкие широко применяются при сейсмическом микрорайонировании территории, так как балльность однозначно не определяет сейсмическую опасность колебаний грунтов при землетрясениях расчетной интенсивности. Для прогноза поведения грунтов при сильных сейсмических воздействиях, согласно нормативным документам по сейсмическому микрорайонированию, из расчетных методов включены: метод тонкослоистых сред (МТС) и метод конечных элементов (МКЭ). Первый из них используется для расчетов сейсмических воздействий оснований линейных сооружений представленных моделями плоскопараллельных слоистых сред, а второй – для сред с границами раздела произвольной геометрической формы.

Необходимо отметить и методы, учитывающие нелинейные свойства грунтов. Такие методы реализованы, например, в программах SHAKE и EERA, основой которых является эквивалентное линейное приближение в модификации модели Кельвина-Фогхта, а также в программе NERA, позволяющей вычислять нелинейную реакцию грунтовой толщи на сейсмические воздействия.

Основным недостатком указанных расчетных методов, так или иначе учитывающих нелинейные явления, является ограничение типов рассматриваемых волн, механизма обмена и углов подхода сейсмического луча. Поэтому в случае падения на горизонтально-слоистую грунтовую толщу из упругого полупространства волн различных типов при произвольных углах подхода применяется метод тонкослоистых сред (МТС). Кроме того, необходимо отметить, что эмпирические способы СМР так или иначе учитывают нелинейные свойства грунтов.

Для получения амплитудно-частотных характеристик верхней зоны разреза в основном используются метод тонкослоистых сред, метод спектральных отношений H/V , а в некоторых

случаях прямой способ, когда землетрясение регистрируется на полускальном и изучаемом грунтах.

Программное обеспечение, реализующее данные методы, разработано в 70-80-е годы прошлого века. Оно не имеет графического интерфейса, а ввод и вывод данных организован с помощью файлов. Это крайне не эффективно для расчёта большого количества сейсмогрунтовых моделей. В то же время, нецелесообразным было бы вносить коррективы в уже отлаженный и имеющий проверенную многолетней инженерной практикой теоретическую основу программный код. Поэтому, без внесения корректив в исходный код, автором разработана графическая оболочка для указанного комплекса программ, которая автоматизирует процесс работы с файловой системой и имеет удобный графический интерфейс, облегчающий ввод данных. Использовался язык программирования C# и библиотека классов .NET Framework. Разработанная программа позволяет в несколько раз сократить время расчетов, а соответственно и повысить эффективность использования данных методов. Графический интерфейс представлен на рисунке 1. Кроме того, разработаны и другие программы, осуществляющие конвертацию файлов сейсмических данных различных форматов для последующей их обработки. А также программное обеспечение для экспрессобработки сейсмограмм по методу преломленных волн и визуализации эпицентров землетрясений.

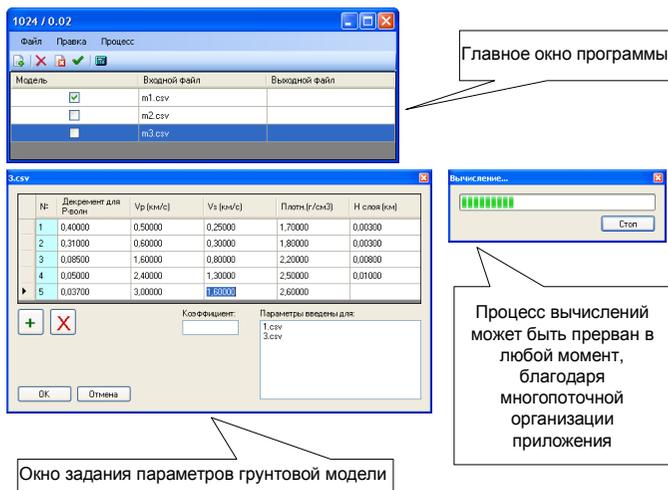


Рис. 1. Графический интерфейс программы.

2. Установленные эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта при землетрясениях от магнитуды и расстояния дают возможность реализовать прогноз акселерограмм сильных землетрясений для конкретных территорий Байкальской рифтовой зоны.

На частотный и амплитудный состав записей землетрясений существенное влияние оказывает строение самой верхней части разреза до монолитных скальных пород. Учет этого

влияния при обработке записей землетрясений приводит к необходимости введения различных поправок.

Для определения частотных характеристик грунтов под сейсмическими станциями Прибайкалья были использованы два способа – расчетный, основанный на построении скоростных сейсмических моделей верхней зоны разреза, и способ спектральных отношений N/V , опирающийся на использование записей землетрясения на одной сейсмической станции. Дополнительно для сейсмической станции “Иркутск” применялся прямой способ получения частотных характеристик верхней зоны разреза. Для этого были использованы спектры ускорений землетрясений, зарегистрированные одновременно на изучаемом и полускальном грунтах. Используются записи землетрясений, зарегистрированных сетью сейсмических станций Байкальского филиала ГС СО РАН.

При реализации расчетного способа для большинства сейсмических станций Прибайкалья были получены скоростные сейсмические разрезы. Верхнюю часть разреза от дневной поверхности до плотных коренных пород необходимо представить физико-геологической моделью, которая должна описываться некоторым набором параметров, необходимых при решении прямых и обратных задач динамической теории упругости. Сложность реальных сред заставляет прибегать к значительным упрощениям. Обычно эти упрощения сводятся к замене реальной среды упрощенной моделью, характеризуемой небольшим числом параметров, т.е. точные решения заменяются приближенными.

Основными определяемыми параметрами были скорости сейсмических волн – продольных (V_p) и поперечных (V_s), плотности пород (ρ), а также границы раздела. Определение скоростей производилось сейсморазведочными методами, измерения выполнялись методом преломленных волн. Дополнительно для сейсмических станций были проведены электроразведочные работы методом ВЭЗ. Полученные в результате данные использовались для уточнения уровня залегания грунтовых вод, степени трещиноватости, границ раздела и т.п. На основании совокупности полученных данных для каждой сейсмической станции Прибайкалья были построены скоростные модели и проведены теоретические расчёты амплитудно-частотных характеристик верхней зоны разреза. Они представлены на рисунке 2.

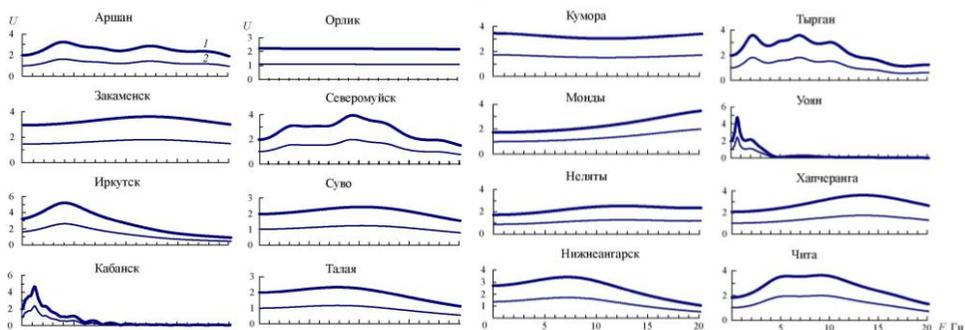


Рис 2. Расчетные частотные характеристики верхней части разрезов под разными сейсмическими станциями. 1 – по отношению к подстилающим твердым породам; 2 – с учетом коэффициента отражения, который равен 2.

Частотные характеристики, полученные методом спектрального отношения, найдены для всех сейсмических станций Прибайкалья. Полученные таким образом частотные характеристики при разных землетрясениях имели иногда значительный разброс как по форме, так и по уровню. Поэтому для каждой сейсмической станции были получены средние частотные характеристики (рис. 3). Разброс частотных характеристик по уровню оценивался среднеквадратичной ошибкой среднего, которая на рисунке показана тонкой линией.

На рис. 3 видно, что частотные характеристики на разных станциях имеют разные уровни и формы. Наиболее выражены по уровню частотные характеристики тех сейсмостанций, приборы которых расположены на достаточно мощных рыхлых отложениях (станции «Иркутск», «Кабанск», «Северомуйск», «Уоян»). Для сейсмостанций, где скальные или разрушенные скальные грунты подходят близко к дневной поверхности, уровень частотных характеристик практически постоянен во всем диапазоне частот, от 0,39 до 20 Гц. К последним относятся также частотные характеристики сейсмостанций, приборы которых расположены на вечномерзлых грунтах, таких как «Чара», «Тупик», «Орлик», «Уакит».

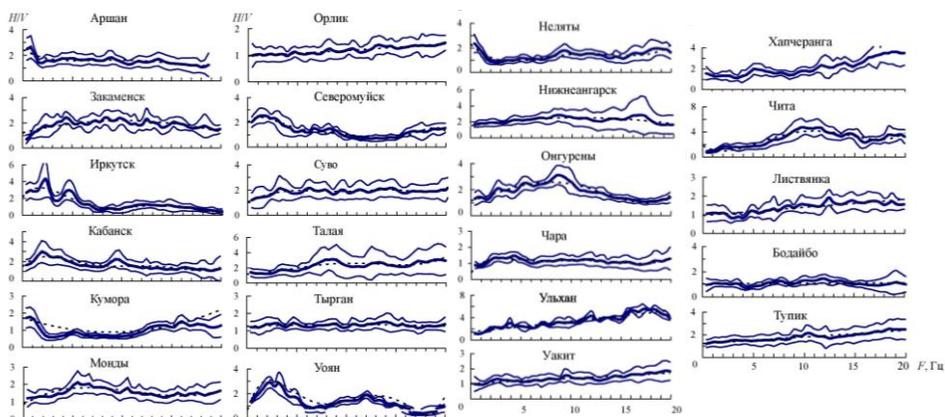


Рис. 3. Средние частотные характеристики верхних зон разрезов на разных станциях, полученные способом спектральных отношений H/V . Тонкими линиями обозначены границы ошибки среднего, пунктирными – линии тренда.

Вместе с тем для некоторых сейсмостанций наблюдается несовпадение частотных характеристик, полученных расчетным методом и методом спектральных отношений. Наиболее наглядно оно проявляется для сейсмостанции «Иркутск». С целью уточнения этого расхождения была определена частотная характеристика верхней части разреза прямым способом. Для этого находилось отношение спектров записей поперечных волн при землетрясениях, зарегистрированных одновременно на изучаемом грунте (сейсмостанция «Иркутск») и на полускальном грунте (сейсмостанция «Эталон»), сложенном песчаниками, лежащими на полупространстве, сложенном алевролитами. Расстояние между ними составляло 2,5 км.

Байкальская рифтовая зона вытянута с юго-запада на северо-восток более чем на 700–800 км. Очаги землетрясений расположены в различных геологических условиях: в центральных

районах большинство из них БРЗ формируется в условиях растяжения, на флангах рифтовой зоны – в условиях сдвига. Для БРЗ характерны коровые землетрясения со средней глубиной залегания очагов $h=10$ км. В работе использованы землетрясения с глубиной $8 \leq h \leq 20$ км.

Для получения эмпирических зависимостей основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта при землетрясениях от магнитуды и расстояния были использованы записи акселерограмм землетрясений, зарегистрированных в течение последних 10 лет сетью сейсмических станций Байкальского филиала ГС СО РАН. Рассматривались землетрясения с магнитудами $M=3.2-6.3$ и эпицентрными расстояниями $\Delta=25-407$ км. На рис. 4 показано относительное расположение сейсмических станций и очагов землетрясений с $M>5$. Основные параметры ощутимых землетрясений представлены в таблице 1.

Землетрясения юго-западной части БРЗ южного и среднего Байкала, а также северо-западного района БРЗ рассмотрены раздельно. При этом были задействованы сеймостанции, расположенные в непосредственной близости к эпицентрам наиболее сильных землетрясений. Все зоны, за исключением южного Байкала, характеризуются приблизительно одинаковыми магнитудами, то же можно сказать и об эпицентральных расстояниях.

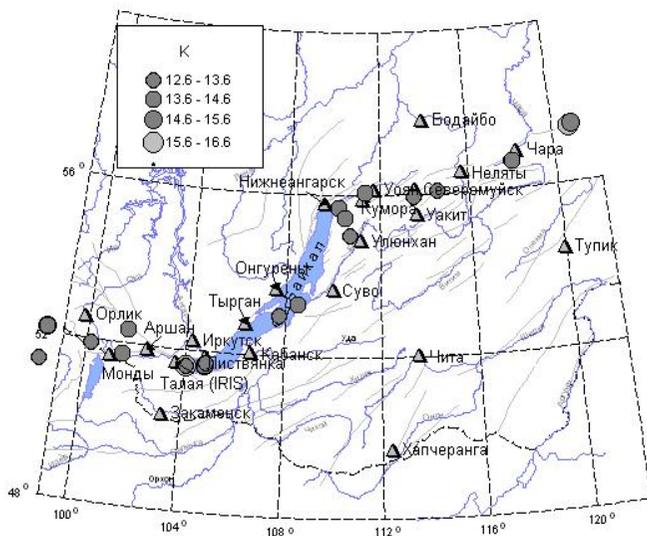


Рис. 4. Карта-схема расположения сейсмических станций и эпицентров рассматриваемых землетрясений БРЗ.

При расчётах использовался участок акселерограмм длительностью 20 с, начиная от вступления поперечных волн. Измерялись максимальные ускорения и соответствующие им частоты, а также длительность колебаний (τ) на уровне $0.5a_m$, спектры рассчитывались для максимальной горизонтальной составляющей акселерограммы.

Для землетрясений БРЗ изменение максимальных ускорений (a_m) с эпицентральным расстоянием и магнитудой для грунтов II категории получено в следующем виде:

$$\lg a_m = 0,65M - 2,362 \lg \Delta + 1,75.$$

Для грунтов III и I категорий вводится поправка к уравнению на величину ± 0.15 соответственно.

Связь a_m с интенсивностью имеет следующий вид:

$$\lg a_m = 0,331I - 0,51.$$

Таблица 1

Основные параметры оцутимых землетрясений

№	Координаты эпицентров		K_p	M	Сейсмостанция, эпицентральное расстояние (Δ , км), интенсивность (I , баллы)
	φ	λ			
1	51.64	104.82	14.6	5.9	Иркутск, 77 км, 5-6 баллов
2	51.65	104.80	13.7	5.4	Иркутск, 75 км, 4-5 баллов
3	52.99	107.71	13.1	5.1	Тырган, 96 км, 4-5 баллов; Суво, 170 км, 2 балла; Иркутск, 245 км, 3 балла
4	56.05	111.34	14.3	5.7	Уоян; 25 км, 5-6 баллов; Кумора, 20 км, 5 баллов; Н.-Ангарск, 117 км, 4 балла; С.-Муйск, 139 км, 3-4 балла
5	51.75	101.46	13.7	5.4	Монды, 38 км, 5 баллов; Аршан, 64 км, 4 балла; Орлик, 144 км, 2 балла; Иркутск, 196, 3-4 балла
6	56.68	117.97	13.5	5.3	Чара, 38 км, 5-6 баллов
7	56.66	118.01	13.8	5.4	Чара, 31 км, 5 баллов; Неяты, 143 км
8	52.35	101.59	13.6	5.3	Аршан, 86 км, 4-5 баллов; Монды, 74 км, 4 балла; Орлик, 123 км, 4-5 баллов; Иркутск, 285 км, 2-3 балла
9	55.67	110.19	13.6	5.3	Н.-Ангарск, 46 км, 4 балла; Кумора, 66 км, 3-4 балла; Улюнхан, 114 км, 3 балла; Уоян, 120 км, 3-4 балла
10	55.42	110.42	14.1	5.6	Кумора, 72 км; Н.-Ангарск, 68 км, 3-4 балла; Уоян, 114 км, 3 балла
11	55.93	113.49	13.3	5.2	С.-Муйск, 28 км, 4-5 баллов; Уакит, 50 км, 3 балла; Улюнхан, 188 км, 3 балла
12	53.28	108.49	14.2	5.7	Онгурены, 72 км, 4 балла; Суво, 109 км, 4-5 баллов; Тырган, 155 км, 4 балла; Иркутск, 307 км, 3 балла
13	52.14	98.32	15.1	6.2	Орлик, 110 км, 6 баллов; Иркутск, 407 км, 3-4 балла
14	52.12	98.31	13.8	5.4	Орлик, 112 км, 4 балла; Иркутск, 405 км, 2 балла
15	51.62	104.06	>15.2	6.3	Иркутск, 72 км, 6-7 баллов; Аршан, 119 км, 6-7 баллов; Закаменск, 147 км, 5 баллов; Тырган, 202 км, 5-6 баллов, дана моментная магнитуда M_w (по данным NEIC)
16	51.61	104.06	13	5.0	Иркутск, 72 км, 5 баллов; Аршан, 119 км; Закаменск, 147 км; Кабанск, 185 км; Тырган, 202 км, 3 балла; Онгурены, 329 км

Примечание. Магнитуда M получена пересчетом из энергетического класса K_p (по Т.Г. Раутиан) по формуле Гуттенберга–Рихтера–Раутиан: $M = (K_p - 4) / 1.8$ [Ризниченко, 1985]; NEIC- Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США.

Одна из форм задания сейсмических воздействий сводится к прогнозу спектра с использованием эмпирических частотно-зависимых функций $\beta_M(f)$ и затухания $n_{эф}(f)$:

$$\beta_M(f) = a \lg(f) + b$$

$$n_{эф}(f) = c \lg(f) - d,$$

где $\beta_M(f)$ – приращение логарифма спектральной плотности с увеличением M на единицу, $n_{эф}(f)$ – эффективный коэффициент затухания спектральной составляющей с расстоянием, характеризующий суммарный эффект за счет расхождения волнового фронта, поглощения из-за неидеальной упругости среды и рассеяния энергии сейсмического сигнала неоднородностями последней.

Спектры рассчитывались методом Уэлча с разрешением по частоте 0,78 Гц и стандартной ошибкой $\varepsilon=0,20$. Нижняя граничная частота определяется длиной анализируемого участка акселерограммы (T) соотношением $f_{нч}=1/T=1/20=0,05$ Гц. Верхняя граничная частота определяется частотой Найквиста, связанной с шагом дискретизации Δt ($\Delta t=0,01$ с) соотношением $F_n=1/(2\Delta t)=50$ Гц. Однако реальные рабочие частоты приходится вынужденно ограничить полосами 0,5–10 и 0,5–20 Гц в соответствии с используемой регистрирующей аппаратурой. Поэтому наиболее достоверно характеризуются спектры в диапазоне 0,5 – 10 Гц.

Для сейсмостанций, регистрирующие приборы которых располагались на рыхлых отложениях, находились амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) верхней толщи зоны разреза методом тонкослоистых сред.

Определение функции $\beta_M(f)$ проводилось для различных регионов БРЗ отдельно, тогда как зависимость $n_{эф}(f)$ рассматривалась для всей зоны в целом в предположении об относительно однородном строении среды в пределах БРЗ и соответственно приблизительно одинаковых условиях распространения сейсмических волн в ее пределах.

В результате для функции затухания $n_{эф}(f)$ было получено следующее выражение:

$$\begin{cases} n_{эф}(f) = 0,94, f \leq 1 \text{ Гц} \\ n_{эф}(f) = 0,94 f^{0,39}, f > 1 \text{ Гц} \end{cases}$$

Полученные для разных районов значения функции $\beta_M(f)$ различались незначительно, в пределах ошибки определения. Поэтому в окончательном виде функции объединили в одну:

$$\begin{cases} \beta_M(f) = 0,94, f \leq 1 \text{ Гц} \\ \beta_M(f) = -0,37 \lg(f) + 0,94, f > 1 \text{ Гц} \end{cases}$$

Таким образом, сравнивались два способа количественной оценки сейсмических воздействий – по a_m и с использованием спектров. Используя полученные функции $n_{эф}(f)$ и $\beta_M(f)$, возможно, во-первых, прогнозировать сейсмические воздействия различных магнитуд на разных расстояниях и, во-вторых, дать прогнозную оценку сейсмических воздействий, имея записи относительно слабых землетрясений.

С использованием полученных зависимостей в работе отдельно были исследованы спектры ускорений колебаний грунта, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны. Данный вопрос является немаловажным, так как средние спектры Фурье ускорений при землетрясениях описывают амплитудно-частотный состав сильных движений грунта, характеризующих ту или иную сейсмически опасную зону. В работе использованы записи акселерограмм землетрясений с $M = 4-6,5$ и эпицентрными расстояниями 50–350 км. Эпицентры землетрясений представлены на рисунке 5.

Спектры ускорений, полученные на каждой станции, приводились к скальному основанию, путем деления на соответствующую частотную характеристику верхней зоны разреза грунтов под сейсмической станцией. Затем спектры приводились к одному

эпицентральному расстоянию $\Delta=70$ км. Далее находился средний спектр ускорения данного землетрясения. Такой подход практически исключал возможное влияние на спектр грунтовых толщ под сейсмостанциями, пути распространения сейсмического излучения, а также степени ориентации разрывных нарушений в очаге. При определенном наборе таких средних спектров ускорений производилось разбиение их по магнитуде M . Шаг разбиения $\Delta M \sim 1$. После чего, в пределах этого шага, находились средние спектры для средней в данном интервале магнитуды. Всего было получено три осредненных спектра с магнитудами $M=4,2; 5,2; 6,1$. Они могут служить оценочной характеристикой динамических параметров сейсмических сигналов для юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны.

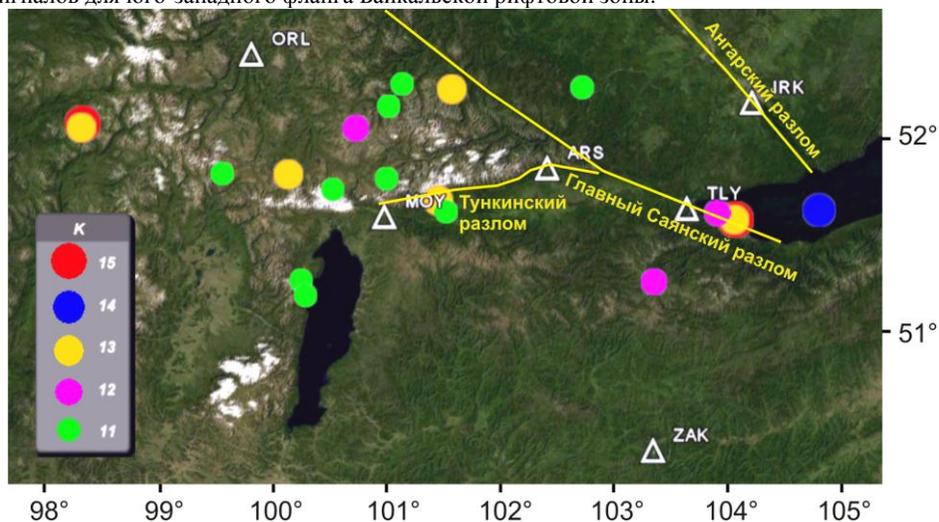


Рис. 5. Карта эпицентров землетрясений юго-западной части Байкальской рифтовой зоны за 1999 – 2009гг., $M > 4$. Δ – сейсмостанция: ARS – Ариан, IRK – Иркутск, MOY – Монды, ORL – Орлик, TLY – Талая, ZAK – Закаменск.

Кроме того, установлено, что частотный состав спектров ускорений зависит от типа подвижки в очаге, выражающийся в расширении спектров по частоте для взбросо-сдвигов и взбросов по отношению к спектрам для сбросо-сдвигов и сдвига со сбросовой компонентой. Уровень спектров ускорений, зарегистрированных на различных сейсмостанциях, зависит от направленности подвижки в очаге. Так на станциях, направление на которые от очага совпадает с направлением тензора сейсмического момента в очаге, уровень спектров превышает уровень спектров на сейсмостанциях, направление от очага на которые близ перпендикулярно последнему. Это говорит о том, что дальнейшее изучение спектров должно быть направлено, не только на их простое уточнение, но и на учет типа подвижек в очаге, их направленности, относительного расположения сейсмостанции и очага и направлений основных разрывных нарушений и других факторов.

3. Разработанная методика формирования исходного сейсмического сигнала с учетом основных параметров зон возникновения очагов землетрясений является основой получения количественных характеристик сейсмических воздействий на здания и сооружения при районировании сейсмической опасности различной степени детальности. Это положение реализовано на примере конкретной строительной площадки.

По карте сейсмического районирования Евразии г. Иркутск относится к 8-9 балльной зоне [Строительные нормы и правила II-7-81*, 2011]. При этом наиболее опасными в сейсмическом отношении зонами для г. Иркутска, в основном, являются внутривпадинные разломы Среднебайкальской, Южнобайкальской и Тункинской впадин, а также разломы, ограничивающие их с восточной и западной сторон. Несколько особняком стоит Главный Саянский разлом, к которому относятся наиболее сильные, в исторической перспективе, землетрясения. На рисунке 6 приведена схема зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) в районе Иркутска. В этих зонах могут происходить землетрясения с максимальной магнитудой M_{max} от 5,5 до 8. В таблице 2 приведены рассмотренные зоны ВОЗ и их основные характеристики.

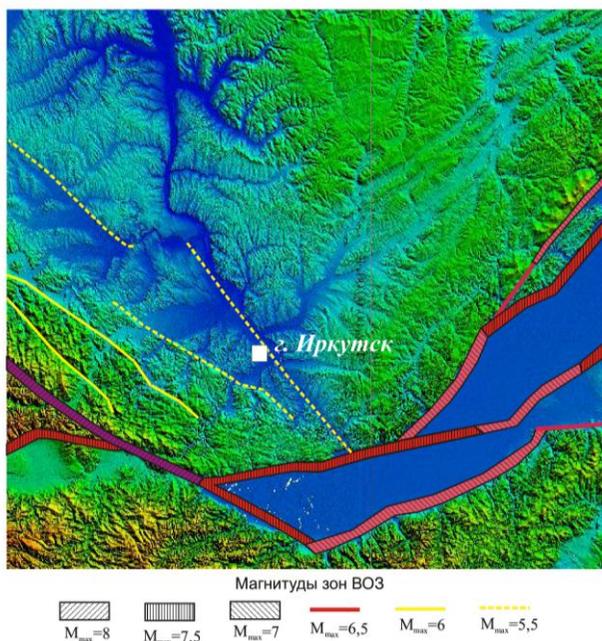


Рис. 6. Зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) в районе г. Иркутска [по А.В.Чипизубову и О.П.Смекалину, 1999)

Для получения оценок сейсмической опасности г. Иркутска из различных зон ВОЗ были использованы реальные записи акселерограмм землетрясений. Перед автором стояли две основные задачи.

1) Для каждой зоны ВОЗ получить ожидаемые акселерограммы землетрясений, опирающиеся на записи акселерограмм реальных землетрясений из рассматриваемых зон.

2) Соотнести полученные максимальные ускорения зон ВОЗ со шкалой сейсмической опасности в баллах и, через последние, с картой сейсмического районирования Евразии.

Таблица 2

Максимальные значения ускорений расчетных акселерограмм сильных землетрясений из ближайших зон ВОЗ для г. Иркутска

	Зоны возможных очагов землетрясений (ВОЗ)	M	Δ, км	a_{max}, см/с²	Сейсмическая интенсивность, I, балл (MSK-64)
1	Восточно-Саянская (Главный Саянский разлом, взбросо-сдвиг)	8,0	74	215	8
2	Тункинская (восточная) (Тункинский разлом, сбросо-сдвиг)	7,5	120	55	6
3	Тункинская (западная) (Тункинский разлом, взбросо-сдвиг)	7,0	196	23	5
4	Приморская (субширотная) (Приморский разлом, сброс)	7,5	63	179	8
5	Приморская (южная) (Приморский разлом, сдвиго-сброс)	7,0	80	89	7
6	Южно-Байкальская (Ангаро-Байкальский разломный узел, сброс)	7,5	77	167	8
7	Селенгинская (Дельтовый разлом, сброс)	7,5	165	81	7
8	Ольхонская (Ольхонский разлом, сброс)	7,5	190	61	7

Примечание. M – магнитуа потенциального землетрясения зоны ВОЗ, Δ – эпицентрального расстояния до зоны ВОЗ, a_{max} – максимальные значения ускорений рассчитанных акселерограмм, I – балльность, соответствующая a_{max} .

В работе использованы записи акселерограмм землетрясений с 1999 по 2012 годы, ощущаемых на территории г. Иркутска с интенсивностью сотрясений 2-6 баллов по шкале MSK-64 и $M \geq 4$ в очаге. Очаги землетрясений располагались на глубине от 10 до 20 км. Акселерограммы регистрировались сейсмической станцией «Иркутск» цифровыми каналами, имеющими столбчатые частотные характеристики на уровне $0,7U_{max}$ в диапазоне частот 0,05–10 Гц. Шаг дискретизации составлял $\Delta t = 0,01$ с, что обеспечивало получение спектров без искажений в указанном диапазоне частот. Спектры рассчитывались по горизонтальной компоненте для участка длительностью 20 с от вступления S-волн методом БПФ. Затем спектры ускорений землетрясений, зарегистрированных сейсмостанцией «Иркутск», приводились к грунтам первой категории с параметрами $\rho=2,4$ г/см³, $Vp=3,0$ км/с, $Vs=1,56$ км/с, путем деления на частотную характеристику верхней зоны разреза под сейсмостанцией. Всего было обработано 29 акселерограмм. Записи афтершоков для расчета спектров не использовались из-за их обеднения низкими частотами по сравнению с основным землетрясением и форшоками.

Поскольку землетрясения, относящиеся к одной зоне ВОЗ, имели разные эпицентрального расстояния и магнитуды автором были использованы полученные во второй

главе зависимости, учитывающие изменения спектров с эпицентральной расстоянием и магнитудой для рассматриваемого региона.

После приведения спектров акселерограмм к эпицентральному расстоянию и магнитуде, характерным для данной зоны ВОЗ, находились средние спектры ускорений. Эти средние спектры и принимались за основу при получении акселерограмм, характеризующих данную зону ВОЗ.

Нахождение акселерограмм сводилось к обратному преобразованию Фурье с использованием средних амплитудных спектров и фазовой характеристики одной из нескольких записей.

Замена фазового спектра одной акселерограммы на фазовый спектр другой влекла за собой изменение максимальной амплитуды ускорений, не превышающей, как правило, $\pm 10\%$ от среднего значения. В отдельных случаях это отклонение достигало 17%. Учитывая, что среднее значение обеспечивает уровень вероятности $P=0,5$, указанная ошибка вполне приемлема.

Полученные описанным выше образом акселерограммы и их спектры для всех рассматриваемых зон ВОЗ приведены на рисунке 7.

В таблице 2 приведены оценки сейсмической опасности рассмотренных зон ВОЗ из полученных акселерограмм по максимальным ускорениям в баллах в соответствии со шкалой балльности MSK-64. Из таблицы видно, что для рассмотренных зон ВОЗ максимальная интенсивность при землетрясениях для грунтов 1 категории на территории г. Иркутска проявляется от 5 до 8 баллов.

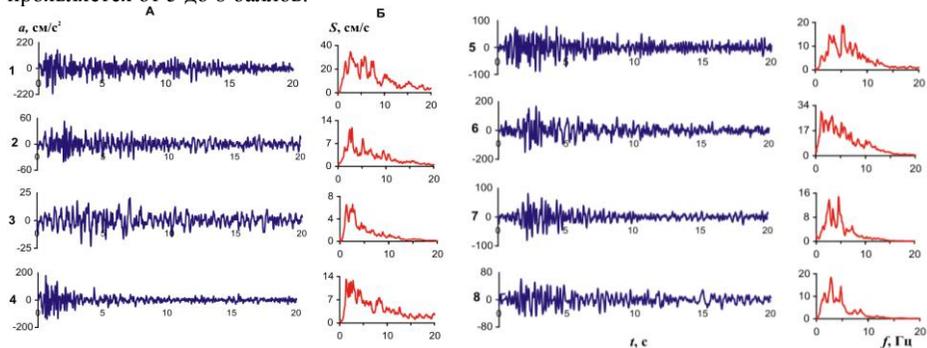


Рис. 7. Прогнозные акселерограммы (А) и соответствующие им амплитудные спектры (Б) для рассматриваемых зон ВОЗ.

Для территории г. Иркутска, и для иркутской агломерации необходимо создание одного исходного сейсмического сигнала, но с тем условием, что бы он учитывал особенности спектрального состава колебаний из каждой выбранной зоны ВОЗ. Для этого спектры колебаний были нормированы, затем они усреднялись, рассчитывалась фазовая характеристика одной из записей землетрясений и, обратным преобразованием Фурье, проводился расчет нормированной акселерограммы (рис. 8, А). Амплитудный спектр (см. рис. 8, Б) этого сигнала отражает все частотные особенности акселерограмм, которые спрогнозированы для отдельных зон ВОЗ. Его уровень, превышающий значение 0,7 от максимального ($0,7S_{max}$), лежит в интервале частот 0,97-5,22 Гц. Основной максимум приходится на частоту 2,88 Гц, спектральная плотность достигает значения 0,165 см/с.

Для того чтобы использовать исходный сейсмический сигнал в дальнейших теоретических расчетах для различных грунтовых условий, необходимо привести его к эталонному грунту. По литературным данным были получены гистограммы распределения скоростей продольных волн

и объемной массы в скальных и полускальных породах для территории г. Иркутска. Это распределение дает наиболее вероятные параметры, которые используются при составлении сейсмогрунтовых моделей для типовых грунтовых условий. На рисунке 9 представлены параметры таких моделей: модель коренных пород (М-1), а также модели для неводонасыщенных (М-2) и водонасыщенных грунтов (М-3). Для того чтобы сейсмический сигнал соответствовал исходной сейсмичности территории, равной 8 баллам, он был масштабирован с использованием модели М-1. Полученные расчётные параметры сейсмических воздействий отражены на рисунке 9. Они могут использоваться при планировании строительства различных объектов на территории иркутской агломерации.

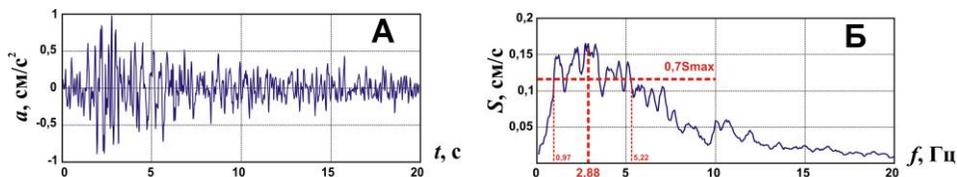


Рис. 8. Исходная нормированная акселерограмма (А) и ее амплитудный спектр (Б).

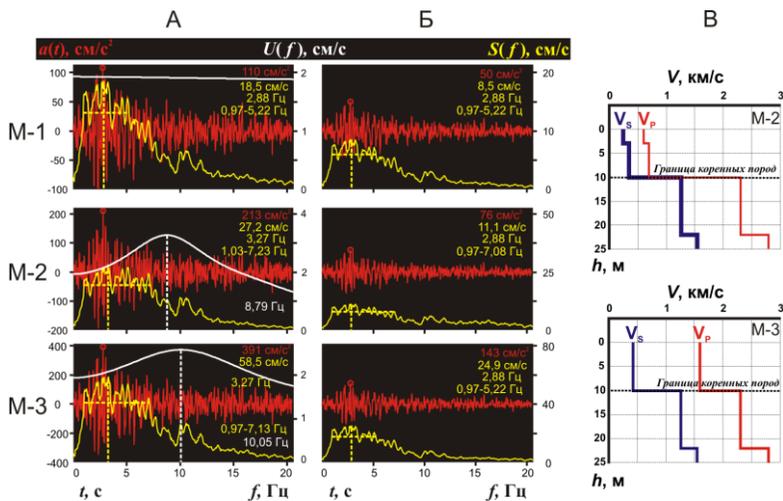


Рис. 9. Результаты теоретических расчетов для моделей эталона. Акселерограммы, спектры и частотные характеристики: А – для горизонтальной, Б – для вертикальной компоненты. На графиках сверху вниз обозначены максимальное ускорение, максимальное значение спектра, частота основного максимума спектра, диапазон частот на уровне $0,7S_{\text{max}}$, резонансная частота рыхлой толщи. В – параметры моделей М-2 и М-3.

Разработанная методика формирования акселерограммы, соответствующей исходной сейсмичности территории, использовалась при комплексной оценке сейсмической опасности участка строительства аэропорта, который находится в Прибайкальском районе Республики Бурятия, в нескольких километрах от села Горячинск.

Исходная акселерограмма синтезирована при использовании местных землетрясений. Её параметры отвечают как близким, так и относительно далеким сильным землетрясениям, то есть, по частотному составу учтены основные особенности зон ВОЗ, определяющих сейсмическую опасность площадки строительства. Продолжительность колебаний около 20 с на уровне 0,3 от максимума, интервал частот спектра на уровне 0,5 от максимума для горизонтальных компонент (NS и EW) меняется от 1,9 до 16,1 Гц, на уровне 0,7 от максимума – от 2,49 до 11,8. Максимальные значения основных максимумов спектра приходятся на частоты 8,74 и 6,79 Гц, а их значения достигают 36,5 и 40,8 см/с. Максимальное значение ускорений достигает 196-200 см/с².

Для проведения теоретических расчетов было построено 5 типовых моделей, которые характеризуются мощностью слоев, скоростями распространения продольных и поперечных волн и плотностью грунтов. Для этого в том числе использовались результаты интерпретации данных, полученных методами сейсморазведки и электроразведки.

В итоге, кроме оценки сейсмической опасности участка строительства в баллах по шкале MSK-64, равной 9 баллам, были получены количественные характеристики колебаний грунта для различных участков на территории строительства для прогнозируемых сильных землетрясений. Максимальные ускорения колебаний могут меняться от 359 до 453 см/с² для NS и от 183 до 242 см/с² для Z компонент. Максимумы спектров лежат в интервале 58,4-90,4 см/с – NS и 41- 52,9 см/с - Z. Ширина спектра на уровне 0,7 от максимума находится в интервале частот от 2,98 до 15,3 Гц. Резонансные свойства рыхлых грунтов лежащих на коренных породах ожидаются на частотах от 4,25 до 17 Гц.

Заключение

В работе проведён анализ существующих расчётных методов, позволяющих получить амплитудно-частотную характеристику верхней зоны разреза. Отмечается, что одни из этих методов учитывают нелинейные явления, другие – типы сейсмических волн, механизмы обмена и углы подхода сейсмического луча. В то же время при умеренном сейсмическом воздействии поведение грунтов не выходит за рамки основных положений теории упругости, согласно которым нормальные напряжения линейно зависят от деформаций. Поэтому для приведения записей землетрясений, зарегистрированных на сейсмических станциях, к грунтам 1-й категории использовался в основном метод тонкослоистых сред. В то же время необходимо отметить, что эмпирические способы сейсмического микрорайонирования так или иначе учитывают нелинейные свойства грунтов, в т.ч. использовавшийся в работе способ спектральных отношений. Кроме того, в рамках данной работы было разработано программное обеспечение, позволяющее в разы повысить эффективность расчётов.

В работе впервые определены частотные характеристики верхней зоны разрезов под всеми сейсмическими станциями Прибайкалья. Это позволило оценить основные параметры сильных движений грунта в Байкальской рифтовой зоне за последние десять лет и получить эмпирические зависимости основных динамических характеристик ускорений колебаний грунта от магнитуды и расстояния.

С использованием этих зависимостей по имеющимся экспериментальным записям ускорений рассчитаны средние амплитудные спектры, которые приведены к потенциально возможным магнитудам зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ), определяющих

сейсмическую опасность территории г. Иркутска и иркутской агломерации. По полученным амплитудным спектрам и фазовым спектрам реальных землетрясений путем обратного преобразования Фурье рассчитаны ожидаемые акселерограммы соответствующих зон ВОЗ.

На их основе по предложенной в работе методике сформирован сейсмический сигнал, соответствующий исходной сейсмичности рассматриваемой территории. Показана возможность использования полученного исходного сигнала и проведены теоретические расчеты для сейсмогрунтовых моделей, характеризующих вероятностные модели эталона для коренных пород (грунтов 1-й категории), средних грунтов (2-й категории) и водонасыщенных грунтов. Получены оценки сейсмических воздействий для зоны с исходной сейсмичностью 8 баллов, и используя модели эталона, для 9-балльной зоны с различной по мощности грунтовой толщей водонасыщенных и неводонасыщенных грунтов. Эти результаты можно использовать при планировании возможного строительства на территории иркутской агломерации. Также разработанная методика может использоваться и при комплексной оценке сейсмической опасности, что реализовано на примере конкретной строительной площадки.

Основные работы, опубликованные по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Джурик В.И. Районирование сейсмической опасности территории г. Эрдэнэт на основе количественных характеристик колебаний грунтов при сильных землетрясениях / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Т.Г. Рященко, А.Ю. Ескин, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак**, Ц.Батсайхан, Т.Дугармаа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010. – №2. – С. 38–43.

2. Джурик В.И. Инженерно-сейсмологическое обеспечение безопасности строительства линейных сооружений в сейсмоактивных районах Южной Якутии с учетом деградации мерзлоты / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Ю. Ескин, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак**, А.Н. Шагун // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2011. – Т.4, №1. – С. 60–78.

3. Джурик В.И. К районированию сейсмической опасности территории г. Иркутска / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Ф. Дреннов, **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин, А.Н. Шагун, А.Ю. Ескин // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2011. – Т.4, №2. – С. 61–81.

4. Джурик В.И. Опыт районирования линейных сооружений в пределах криолитозоны по максимальным ускорениям при использовании экспериментальных частотных характеристик / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Н. Шагун, А.Ю. Ескин, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак** // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2012. – №1. – С. 59–64.

5. Джурик В.И. Методика районирования сейсмической опасности приграничных территорий Монголо-Сибирского региона (на примере района г. Эрдэнэт) / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Ц. Батсайхан, А.Ф. Дреннов, **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин, А.Ю. Ескин // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2012. – Т.5, №1 – С. 118–142.

6. Джурик В.И. Методика формирования исходного сейсмического сигнала с целью районирования сейсмической опасности городских агломераций (на примере г. Иркутска) /

В.И. Джурик, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, А.Ф. Дреннов, А.Ю. Ескин // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 96–110.

7. Джурик В.И. Пример комплексной оценки сейсмической опасности участка строительства аэропорта «Горячинск» / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак**, А.Ю. Ескин, А.Н. Шагун // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 28–45.

8. Дреннов А.Ф. Спектры ускорений колебаний, возбуждаемых землетрясениями юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны / А.Ф. Дреннов, В.И. Джурик, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, Н.Н. Дреннова // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 2. – С. 292–301.

Статьи, опубликованные в сборниках и материалах конференций:

1. Джурик В.И. Районирование протяженных трасс линейных сооружений в условиях Забайкалья по вероятным максимальным сейсмическим воздействиям / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, А.Ю. Ескин, **Е.В. Брыжак**, А.Н. Шагун // Материалы конференции «Геокриологические проблемы Забайкалья и сопредельных территорий». – Чита, 2010. – С. 43–51.

2. Серебренников С.П. Сравнительный анализ проявления сильных землетрясений в различных климатических зонах Монголии и Восточной Сибири / С.П. Серебренников, В.И. Джурик, Ц. Батсайхан, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак** // Материалы конференции «Геокриологические проблемы Забайкалья и сопредельных территорий». – Чита, 2010. – С. 52–59.

3. Джурик В.И. Основы методики районирования сейсмической опасности протяженных трасс линейных сооружений в криолитозоне / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак** // Материалы 4-й конференции геокриологов России. – Т.1, Ч.2. – Москва, 2011. – С. 181–187.

4. **Брыжак Е.В.** Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных оценок параметров сейсмических воздействий для грунтовых моделей различного состояния / **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин // Материалы XXIV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика». – Иркутск, 2011 – С. 191–192.

5. Усынин Л.А. Комплексная оценка сейсмической опасности линейных сооружений с учетом деградации мерзлоты / Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак** // Материалы XXIV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск, 2011. С. 215–216.

6. Джурик В.И. Задание исходных сигналов с учетом местных сейсмогеологических условий для территории г. Иркутска / В.И. Джурик, А.Ф. Дреннов, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак** // Материалы IX Российской Национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию «Сочи-2011». – Сочи, 2011. – С. 8.

7. Джурик В.И. Прогноз сейсмических воздействий оснований линейных сооружений с учетом деградации мерзлоты в районах Южной Якутии / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, А.Н. Шагун, **Е.В. Брыжак**, А.Ю. Ескин // Материалы Всероссийской научной

- конференции «Геология, тектоника и металлогения Северо-Азиатского кратона». – Якутск, 2011. – Т.1. – С. 24–29.
8. Джурик В.И. Выявление зон разломов и ослабленных участков горных пород в районах Монголии с помощью малоглубинной геофизики / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин, Ц. Батсайхан // Тезисы докладов IX Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. Иркутск, 2011. – С. 19.
9. Серебренников С.П. Геофизические исследования особенностей проявления сейсмичности в криолитозоне Монголо-Сибирского региона / С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, В.И. Джурик, Ц. Батсайхан, А.Ю. Ескин, **Е.В. Брыжак** // Тезисы докладов IX Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. – Иркутск, 2011. – С. 25.
10. Джурик В.И. Развитие методов задания исходных сигналов сильных землетрясений для территории строительства в Монголо-Сибирском регионе / В.И. Джурик, **Е.В. Брыжак**, С.П. Серебренников, Ц. Батсайхан, А.Ф. Дреннов // Тезисы докладов IX Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. – Иркутск, 2011. – С. 25–26.
11. Джурик В.И. Результаты изучения параметров электрических и сейсмических полей в верхней части земной коры на участках предполагаемых зон разломов Монголии и Сибири / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Ю. Ескин, Л.А. Усынин, Е.В. Брыжак // Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе». – Иркутск, 2012. – Т.1. – С. 141–143.
12. **Брыжак Е.В.** Сравнительный анализ результатов расчетных методов сейсмического микрорайонирования / **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин // Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе». – Иркутск, 2012. – Т.2. – С. 10–13.
13. Джурик В.И. Методика формирования исходного сигнала для территории г. Иркутска с целью районирования его сейсмической опасности / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, А.Ф. Дреннов // Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы «Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе». – Иркутск, 2012. – Т.2. – С. 146–148.
14. Dzhurik V.I. Technique and experience of seismic zoning of the cities of Ulaanbaatar and Erdenet / V.I. Dzhurik, S.P. Serebrennikov, **E.V. Bryzhak**, L.A. Usynin, A.Yu. Eskin, Ts. Batsaikhan // The 9th General Assembly of Asian seismological commission abstract book. – Ulaanbaatar, Mongolia, 2012. – P. 276–279.
15. Serebrennikov S.P. Geological-geophysical approach to the recognition of fault zones near the city Ulaanbaatar and their consideration in seismic zoning of site areas / S.P. Serebrennikov, V.I. Dzhurik, L.A. Usynin, A.Yu. Eskin, **E.V. Bryzhak**, Ts. Batsaikhan // The 9th General Assembly of Asian seismological commission abstract book. – Ulaanbaatar, Mongolia, 2012. – P. 273–275.
16. Джурик В.И. Выявление зон разломов и ослабленных участков горных пород в районах Монголии с помощью малоглубинной геофизики / В.И. Джурик, А.Ю. Ескин, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, Л.А. Усынин, Ц. Батсайхан // Современная геодинамика и

опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт земной коры СО РАН, 2012. – Вып. 7. – С. 60–63.

17. Серебренников С.П. Геофизические исследования особенностей проявления сейсмичности в криолитозоне Монголо-Сибирского региона / С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, В.И. Джурик, Ц. Батсайхан, А.Ю. Ескин, **Е.В. Брыжак** // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт земной коры СО РАН, 2012. – Вып.7. – С. 82–84.

18. Джурик В.И. Развитие методов задания исходных сигналов сильных землетрясений для территорий строительства в Монголо-Сибирском регионе / В.И. Джурик, **Е.В. Брыжак**, С.П. Серебренников, Ц. Батсайхан, А.Ф. Дреннов // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. – Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт земной коры СО РАН, 2012. – Вып.7. – С. 85–88.

19. Dzhurik V. Seismic hazard assessment of Irkutsk, Russia: calculation of synthetic accelerograms and site response analysis / V. Dzhurik, S. Serebrennikov, A. Drennov, **E. Bryzhak** // European Geosciences Union General Assembly 2013 abstracts. – Vienna, Austria, 2013. – P. 2692.

20. Sankov V. On abrupt transpression to transtension transition in the South Baikal rift system (Tunka – South Baikal segment) / V. Sankov, A. Parfeevets, A. Lukhnev, A. Miroshnichenko, S. Ashurkov, A. Sankov, L. Usynin, A. Eskin, **E. Bryzhak** // European Geosciences Union General Assembly 2013 abstracts. – Vienna, Austria, 2013. – P. 2683.

21. **Брыжак Е.В.** Методика формирования акселерограмм сильных землетрясений для районов среднего Байкала / **Е.В. Брыжак**, В.И. Джурик, С.П. Серебренников, Л.А. Усынин, А.Ю. Ескин // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии». – Улан-Удэ, 2013. – С. 39–40.

22. Усынин Л.А. Районирование сейсмической опасности площадки аэропорта «Горячинск» с помощью инструментальных методов / Л.А. Усынин, **Е.В. Брыжак**, В.И. Джурик, С.П. Серебренников, А.Н. Шагун // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодинамика и минерагения Северо-Восточной Азии». – Улан-Удэ, 2013. – С. 364–365.

23. Джурик В.И. Методика районирования сейсмических воздействий для строящихся промышленных объектов в пределах активной тектонической структуры Танлу-Курского линейного элемента / В.И. Джурик, С.П. Серебренников, **Е.В. Брыжак**, А.Н. Шагун // VIII Косыгинские чтения. Материалы всероссийской конференции «Тектоника, глубинное строение и минерагения востока Азии» – Хабаровск, 2013. – С. 387–390.

24. **Брыжак Е.В.** Способ повышения эффективности расчетных методов сейсмического микрорайонирования / **Е.В. Брыжак** // Материалы XXV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика». – Иркутск, 2013. – С. 143–144.

25. Добрынина А.А. Особенности затухания сейсмических волн в литосфере зон континентального рифтогенеза / А.А. Добрынина, **Е.В. Брыжак**, А.В. Саньков, Л.А. Усынин, А.Н. Шагун // Сборник статей молодых ученых Иркутского научного центра Сибирского отделения РАН. – Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2013. – Вып.2. – С. 28–29.

