

ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 2 / 2017



УДК 550.34

DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9496

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ В ИНЖЕНЕРНЫХ ЦЕЛЯХ.

© 2017 Ю. К. Чернов¹, д.ф.-м.н., проф., А. Ю. Чернов²

¹Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Институт строительства ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Россия, 355029, Ставропольский край, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2.

Предложены вероятностные модели пиковых ускорений, спектров и других параметров сильных движений, основанные на статистическом анализе большого объема данных по инструментальной регистрации землетрясений. Модели позволяют повысить точность и надежность прогнозных оценок на региональном и локальном уровне за счет более полного учета особенностей потенциально опасных очагов землетрясений и свойств окружающей геологической среды, включая местные грунтовые условия.

Ключевые слова: сильные землетрясения, сейсмическая опасность, вероятные сейсмические воздействия, пиковые ускорения колебаний грунта, спектры, периоды, длительности.

Актуальность. Современный анализ сейсмической опасности предполагает рассмотрение как единого целого двух форм сейсмических движений – распределенного в пространстве и во времени процесса возникновения очагов землетрясений и вызываемых ими сотрясений поверхности. Обе эти формы по причине их зависимости от большого числа неконтролируемых природных факторов имеют случайную природу и количественно могут прогнозироваться лишь с некоторой долей неопределенности, т. е. в вероятностной форме.

Работами С. В. Медведева, С. А. Корнелла, В. В. Штейнберга и др. [Чернов, 1989, 2016; Разработка..., 2003, 2004] общая научная база таких исследований уже создана. Но детальные рекомендации, единым образом регламентирующие способы таких вероятностных оценок пока не разработаны. Поэтому на практике часто возникают затруднения при выборе той или иной расчетной схемы, той или иной модели сейсмического воздействия. Рассмотрение второй части вышеуказанной двуединой задачи – вероятностное описание на региональном и локальном уровне количественных (физических) характеристик движений грунта при возникновении сильных землетрясений, в том числе применительно к условиям Северного Кавказа и составляет основное направление настоящих исследований.

Анализ проблемы и постановка задачи. Согласно современным представлениям поле колебаний, создаваемое очагом землетрясения зависит от многих факторов – общих размеров и типа разрыва (сдвиг, взброс, сброс), направления распространения и скорости его вспарывания, величины, скорости нарастания и направле-

ния подвижки, механических свойств вмещающих очаг горных пород, длительности действия источника и др. При распространении в неоднородной геологической среде сейсмические сигналы также существенно и видоизменяются. Для зданий и сооружений, как правило, наиболее опасно короткопериодное излучение, создаваемое работой не всего очага в целом, а его отдельными фрагментами – субисточниками. Эти субисточники (или эффективные излучатели) хотя и контролируются объемом и временем работы очага в целом, но внутри очага могут распределяться достаточно случайно в пространстве и во времени. Разнообразие параметров этих некогерентных источников, в сочетании с пространственной изменчивостью окружающей геологической среды, объективно создают механизм случайности, определяющий стохастическую природу реальных полей сильных движений. Этим обстоятельством, а также недоступностью для прямого наблюдения глубинных областей литосферы (из-за чего невозможно с необходимой точностью задавать соответствующие характеристики очагов и среды) обусловлено доминирующее использование в практике эмпирических вероятностных моделей, основанных на статистическом анализе данных по инструментальной регистрации сейсмических колебаний. Среди инструментальных данных по сильным движениям наиболее распространенными являются акселерограммы, а среди параметров акселерограмм – пиковые ускорения и спектры. Именно эти характеристики чаще всего используются в сейсмостойком проектировании.

Обычно модели сильных движений рассматриваются в виде статистических зависимостей амплитуд или спектров колебаний от магнитуды, расстояния и локальных грунтовых условий. Форма этих зависимостей всеми исследователями принимается схожей – на удалении от очага амплитуды «нормально» затухают с расстоянием. При приближении к очагу затухание замедляется и амплитуды достигают предельных значений. Расхождения же наблюдаются в уровнях и скоростях затухания амплитуд с расстоянием, что, в основном, связано с региональными особенностями исследуемых территорий.

Существование участков слабого затухания амплитуд или ближней зоны обусловлено эффектами протяженности очага землетрясения и наличием в его структуре некогерентных субисточников. Размеры ближней зоны возрастают с увеличением магнитуды, но медленнее, чем увеличиваются габариты очага.

В среднем пиковые ускорения возрастают при увеличении магнитуды землетрясения, но неодинаково на разных расстояниях. В ближней зоне быстрее возрастают амплитуды при небольших землетрясениях ($M \leq 5$). При увеличении магнитуд скорость нарастания амплитуд уменьшается, исчезая совсем при наиболее крупных землетрясениях ($M > 7,0-8,0$). Происходит «насыщение» амплитудного уровня короткопериодных колебаний, определяемое прочностными свойствами вмещающих очаг горных пород. Скорость нарастания амплитуд колебаний от магнитуды увеличивается с расстоянием – т.е. затухание амплитуд с расстоянием при росте магнитуды уменьшается. Это связано с тем, что при росте магнитуд землетрясений увеличиваются периоды максимальных ускорений. Так же, как и в случае зависимостей от расстояния, зависимости от магнитуды в разных регионах могут сильно различаться.

Экспериментальные данные показывают, что уровни спектров в инженерном диапазоне частот (0,3-20 Гц.) возрастают при увеличении магнитуды землетрясения, Самое медленное нарастание спектра с магнитудой наблюдается в ближней

зоне. Наименьшие скорости нарастания имеют высокочастотные составляющие. По мере уменьшения частоты уровень спектра повышается с магнитудой все быстрее. При удалении от очага зависимости уровня спектра от магнитуды становятся сильнее. Также как и зависимости пиковых амплитуд зависимости уровней и скорости затухания спектров с расстоянием имеют региональный характер и могут значительно различаться между собой [Чернов, 1989; Разработка..., 2003].

Помимо пиковых амплитуд и спектров ускорений могут рассматриваться также зависимости от магнитуды и расстояния периодов максимального ускорения, длительностей основной фазы и времени нарастания амплитуды до максимума. Здесь, также как и для амплитуд и спектров, вблизи очага наблюдается ослабление зависимости этих параметров от расстояния с выходом на предельные (в данном случае минимальные) их значения в ближней зоне. По мере удаления от очага значения всех этих параметров возрастают, но с разной скоростью. Наиболее быстро с расстоянием возрастают длительности, наиболее медленно – периоды колебаний [Чернов, 1989; Разработка..., 2003].

Характеристики сейсмических воздействий зависят от механизма подвижки в очаге. Наибольшие значения амплитудных параметров высокочастотных колебаний наблюдаются при взбросах, наименьшие – при сбросах. Для параметров формы и низкочастотных составляющих спектра, наоборот, наибольшие значения наблюдаются при сбросах, а наименьшие при взбросах. Сдвиги занимают промежуточное положение по всем показателям.

Учет влияния локальных грунтовых условий обычно осуществляется корректировкой базовых зависимостей параметров колебаний от магнитуды и расстояния путем введения в них поправочных коэффициентов в виде спектральных характеристик грунта и др. [Штейнберг и др., 1993].

На сегодняшний день экспериментальные зависимости вышеописанного типа являются основным источником наиболее достоверных данных, пригодных для построения вероятностных моделей сильных движений, как составной части детального прогнозирования сейсмической опасности. Основные ограничения, возникающие при этом в российской практике – сильная зависимость прогнозируемых параметров от региональных и локальных факторов, из-за чего затруднено прямое использование уже разработанных для других территорий оценок. Проведение же новых инструментальных наблюдений непосредственно для изучаемых участков в необходимых объемах, как правило, невозможно из-за ограниченности технических и временных ресурсов. В этих условиях представляется целесообразным обобщение уже накопленного обширного экспериментального материала по описанию сильных движений (см. выше) и выработке на этой основе моделей сильных движений, позволяющих на современном уровне проводить вероятностные оценки сейсмической опасности для конкретных строительных объектов в Северо-Кавказском регионе, а также в других сейсмоактивных районах.

Исходные данные и методика исследований. Отличительная особенность настоящих построений состоит в том, что они в значительной мере выполнены не посредством анализа отдельных записей сильных движений (как большинство других исследований), а на основе анализа и обобщения уже разработанных разными авторами «функций затухания» прогнозируемых параметров колебаний. Для этих целей использована подборка из 32-х зависимостей пиковых ускорений колебаний грунта от магнитуды и расстояния [Разработка..., 2003]. Отбор зависимостей про-

изведен таким образом, чтобы отобранный материал представлял различные сейсмоактивные регионы мира – Запад США, Среднюю Азию, Японию, Канаду, Юг Европы, Кавказ, Африку, Южную Америку, Китай и др. Вторым критерий – все отобранные зависимости должны быть известными в мире, опираться на обширный и тщательно обработанный экспериментальный материал и поэтому быть достаточно надежными. Третий критерий (относится к более поздним разработкам) – зависимости должны обобщать большинство из полученных новых данных по сильным движениям.

Большинство из отобранных зависимостей дают удаленность землетрясения в виде расстояний до очага или до разрыва, с которым связывается очаг землетрясения. В тех же случаях, когда исходные зависимости давали удаленности в виде гипоцентральных или эпицентральных расстояний, получаемые по ним оценки в целях увеличения общей статистики и представительности исходных данных нами пересчитаны в среднестатистические расстояния до ближайшего участка очага. Пересчет выполнен исходя из среднестатистических оценок размеров очагов землетрясений соответствующих магнитуд [Штейнберг и др., 1993; Ulomov et al., 1999; Чернов, 2016] при их минимальной глубине и с учетом равновероятного расположения точки наблюдения (на дневной поверхности) по отношению к данному очагу. В соответствии с изложенным при пересчетах принято, что, например, при $M \approx 6,5$ гипоцентральное расстояние $r = 15$ км на исходной зависимости, примерно соответствует среднестатистическому расстоянию до очага (до разрыва) $D = 5$ км, $r = 20$ км – $D = 10$ км, $r = 30$ км – $D = 20$ км, $r = 50$ км – $D = 40$ км, $r = 90$ км – $D = 80$ км, $r = 170$ км – $D = 160$ км, $r = 330$ км – $D = 320$ км. Такие пересчеты являются приближенными и дают определенную погрешность. Однако, как показали специально проведенные проверочные расчеты, а также сопоставления с независимыми определениями макросейсмических интенсивностей они не вносят принципиальных искажений в конечный результат и на данном этапе являются приемлемыми.

На рисунке 1 приведен пример графиков зависимостей пиковых ускорений от расстояния до очага, отобранных для землетрясений мира с магнитудами $M \approx 6,5$ ($M = 6,0-7,0$), как наиболее обеспеченных экспериментальными данными и поэтому наиболее представительных [Разработка..., 2003].

В качестве математической модели параметра вероятного сейсмического воздействия принята предложенная [Чернов, 1989] функция вероятностей непревышения, согласно которой при возникновении одного землетрясения с магнитудой $M = m$, глубиной очага $H = h$, на расстоянии $D = d$:

$$P_{N(M=m;H=h;D=d)=1} [X \leq x_i] = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{x_{\min}}^{x_i} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_x^2}} dx. \quad (1)$$

где x_i – текущее значение параметра X ; a – среднее значение (математическое ожидание) логарифма параметра колебаний; σ_x – стандартное отклонение величины; x_{\min} – достаточно малая величина.

Математические ожидания (средние значения) для выражения (1) получены осреднением оценок по исходным зависимостям (пример на рис. 1).

Спектры Фурье и спектры реакции колебаний грунта в соответствии с рекомендациями [Чернов, 1989] прогнозируются в виде набора значений уровня спектральной плотности или спектральных амплитуд ускорений для 18 спектральных составляющих, логарифмически равномерно распределенных по частотам в инженерном

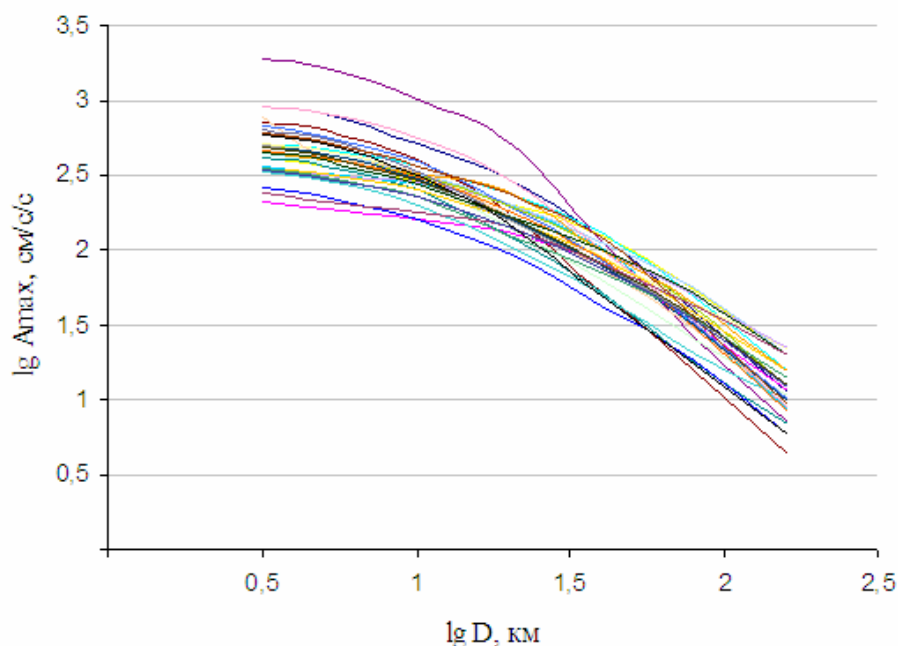


Рис. 1. Примеры статистических зависимостей пиковых ускорений колебаний грунта (A_{max}) от расстояний до очага (D) при землетрясениях с магнитудами $M \approx 6,5$ ($M = 6-7$) в различных районах мира.

диапазоне частот 0,28-22 Гц. Функции распределения вероятностей (выражение (1)) при этом строятся для каждой спектральной составляющей отдельно. Принципы построения те же, что и для единичных параметров колебаний: делаются оценки уровней спектра в ближней зоне землетрясений разных (потенциально опасных) магнитуд и оценки их затухания с расстоянием в дальней зоне.

Для анализа использована совместная подборка из 2200 спектров землетрясений [Чернов Ю., Чернов А., 2008] и 22-х независимых функций затухания спектров в разных районах мира, с разными механизмами подвижки в очаге (взброс, сдвиг, взбросо-сдвиг) в разных грунтовых условиях («твердый», «мягкий» и «средний» грунты): Западный Узбекистан (район Газли); Калифорния; Запад США; Дагестан; Восточный Узбекистан (Ферганская долина, Приташкентский район); Италия (район Фриули); Сахалин (северо-восточный и южный районы, Татарский пролив); Курилы; Приморье; Северный Кавказ; Кавказ (район Спитака, район Рача); Алжир; Дальний Восток (район р. Зея); Тайвань; Центральное Предкавказье [Чернов, 1984, 1989; 1997, 2016; Чернов, Соколов, 1991; Соколов, 1998; Ельченинова, 2000; Уточнение..., 1999; Научно-технический..., 2000; Чернов Ю., Чернов А., 2011].

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 приведен пример результатов осреднения исходных кривых, показанных на рисунке 1, где видно, что аппроксимирующая кривая может быть представлена в виде плавной линии, постепенно выполаживающейся в области малых расстояний. Другой возможный вариант – аппроксимация в виде ломаной линии, состоящей из трех отрезков прямых, где между ближней и дальней зоной есть еще промежуточный участок с пониженным (по сравнению с дальней зоной) затуханием [Аптикаев, 2001]. В данном случае вариант с тремя аппроксимирующими отрезками прямых представляется более удобным для дальнейшего использования. При этом он обеспечивает приемлемую точность расчетов.

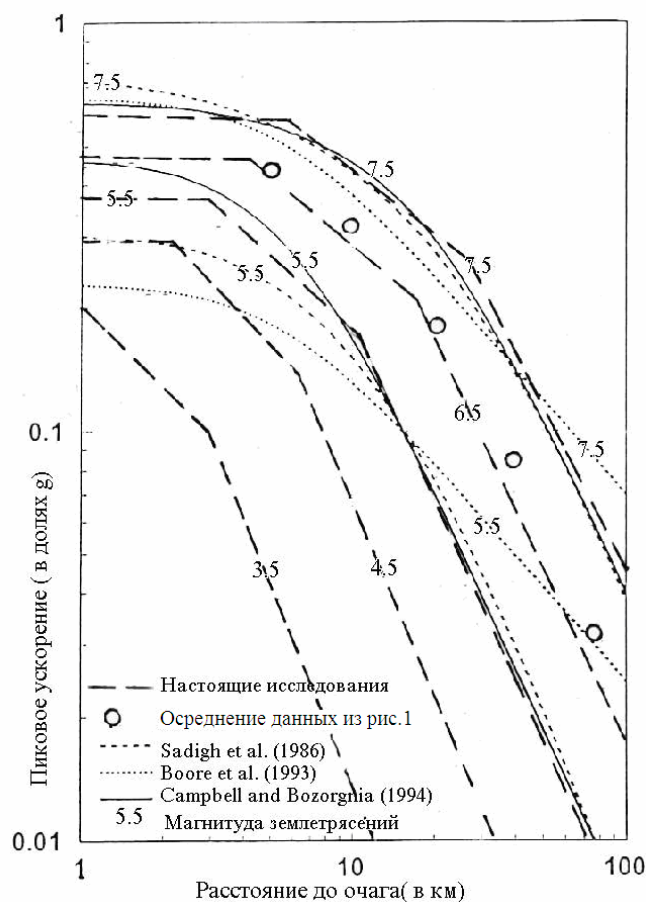


Рис. 2. Функции затухания пиковых ускорений колебаний грунта при землетрясениях разных магнитуд (среднемировые данные) [Boore et al., 1993; Campbell, Bozorgnia, 1994; Sadigh et al., 1986]

Поэтому в настоящем исследовании принята модель затухания, состоящая из трех отрезков прямых.

Аналогичный анализ, выполнен во всем рассматриваемом диапазоне магнитуд и расстояний. На этой основе разработана модификация аналитического выражения для описания модели сейсмического воздействия, которая может использоваться взамен полученных нами ранее выражений [Чернов, 1989] для более точной оценки наиболее вероятных значений пиковых амплитуд ускорений грунта при потенциально опасных землетрясениях разных магнитуд и удаленностей:

$$\lg a = \begin{cases} \lg a_0 \approx const & \text{при } D \leq r'_0 \\ \lg a_0 + (c_1 n + c_0) \lg(D / r'_0) & \text{при } r'_0 \leq D \leq r_0 \\ \lg a_0 + (c_1 n + c_0) \lg(r_0 / r'_0) + n \lg D / r_0 & \text{при } D \geq r_0 \end{cases} \quad (2)$$

где a_0 – математическое ожидание случайной величины X в ближней зоне землетрясения с $M = m$, для функций затухания пиковых ускорений определяемое как:

$$a_0 = \begin{cases} 0,100M + 2,028 & \text{при } M \geq 4,5 \\ 0,176M + 1,686 & \text{при } M \leq 4,5 \end{cases} \quad (3)$$

Скорость затухания амплитуд ускорений с расстоянием в дальней зоне (n) в зависимости от магнитуды землетрясения (M) определяется как:

$$n = 0,06M - 1,819 \quad (4)$$

Границы (размеры) ближней зоны (r_0') и промежуточной зоны (r_0'') землетрясений разных магнитуд (M) для функций затухания пиковых ускорений определяются выражениями:

$$\lg r_0' = \begin{cases} 0,151M - 0,376 & \text{при } M \geq 4,5 \\ 0,304M - 1,064 & \text{при } M \leq 4,5 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lg r_0'' = \begin{cases} 0,210M - 0,151 & \text{при } M \geq 4,5 \\ 0,334M - 0,709 & \text{при } M \leq 4,5 \end{cases} \quad (6)$$

Аппроксимирующие зависимости (2) – (6), графики которых также показаны на рисунке 2, подобраны таким образом, чтобы по возможности итоговые оценки пиковых ускорений для землетрясений с $M = 6,5$ были близки к средним значениям на рисунке 2, т.к. именно эти оценки наилучшим образом обеспечены данными мировых натуральных наблюдений и поэтому наиболее надежны

Как видно из сопоставления пиковых ускорений, рассчитанных по нашей модели для $M = 6,5$ с «натурными» оценками, выражения (2) – (6) дают хорошую сходимость результатов. То, что разработанная модель достаточно реалистична, говорят ее сопоставления с другими, не вошедшими в настоящий анализ данными. Так, например, зависимости, ускорений использованные при разработке карты сейсмической опасности Пиренейского полуострова и стран Магрибского бассейна при $M = 6,5$ оказались близкими к нашей модели [Jimenez et al., 1999]. На рисунке 2 приведено сравнение нашей модели с некоторыми другими известными моделями для землетрясений в диапазоне магнитуд $M = 5,5-7,5$. Здесь такие можно видеть оптимальные результаты, которые дают эти сопоставления.

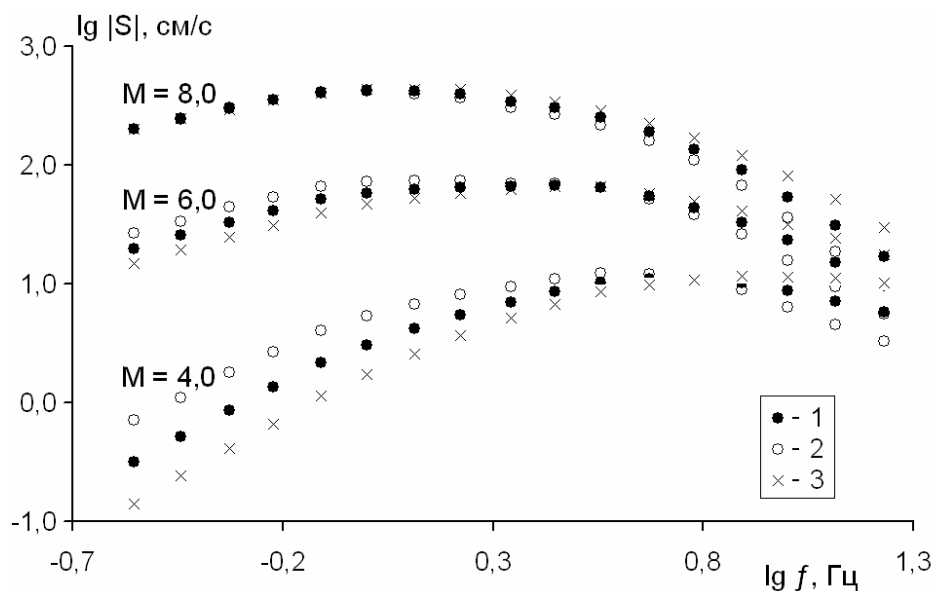


Рис. 3. Среднемировые наиболее вероятные значения спектральной плотности Фурье ($|S|$) ускорений колебаний «средних» грунтов для различных спектральных составляющих (f) в ближней зоне землетрясений разных магнитуд (M) с разными механизмами подвижки в очаге (1 – взбросо-сдвиг, 2 – сдвиг, 3 – взброс).

Для функций затухания спектров внутри дальней зоны дополнительно выделяется подзона ($D = 50-250$ км) с пониженной скоростью затухания спектра с расстоя-

нием – kn . Параметры $lga_0, n, r_0', r_0', c_1, c_0$ из выражения (2), а также k для функций затухания спектров, определены методом подбора так, чтобы обеспечить близость аппроксимирующих оценок всему комплексу исходных данных и соотношений.

На рисунке 3 приведены примеры оценок спектров в ближней зоне «среднестатистических» землетрясений разных магнитуд (величин $lg|S|_0(f)$ из выражения (1)). Построено три группы таких спектров. Базовая группа – спектры, усредняющие все имеющиеся в нашем распоряжении экспериментальные и расчетные данные без разделения землетрясений по механизмам подвижки в очаге и по грунтовым условиям. Эта группа по преобладающим в ней механизмам (взбросам, сдвигам и взбросо-сдвигам) условно названа «взбросо-сдвиги». При построении данной модели согласно рекомендации [Чернов, 1984, 1989] принято, что скорость изменения спектра с магнитудой землетрясения в ближней зоне имеет промежуточные значения между сдвиговыми и взбросовыми землетрясениями:

$$\overline{\beta_M} = -0,383 \lg f + 0,588 \quad (7)$$

где f – частота в герцах; b_M – среднее значение $b_M = D \lg |S| / DM$ по всему диапазону $M = 3,0-8,0$. Внутри этого диапазона предполагается уменьшение b_M при росте M в виде $b_M = \overline{\beta_M} k_\beta$. Масштабирующий коэффициент k_β зависит от магнитуды как $k_\beta = a_1 M + a_0$, где:

$$a_1 = 0,132 \lg f - 0,176; a_0 = -0,724 \lg f + 1,966 \text{ при } f \leq 1,67 \text{ Гц}$$

$$a_1 = \text{const} = -0,146; a_0 = \text{const} = 1,895 \text{ при } 1,67 \geq f \geq 3,6 \text{ Гц} \quad (8)$$

$$a_1 = 0,132 \lg f - 0,176; a_0 = -1,194 \lg f + 2,469 \text{ при } f \geq 3,6 \text{ Гц}$$

Производными от спектров нерасчлененных «взбросо-сдвиговых» землетрясений (В – С) являются также приведенные на рис.3 спектры сдвиговых (С) и взбросовых (В) землетрясений. Пересчет спектров ближней зоны В – С в спектры В и С, выполнен с учетом результатов предыдущих исследований [Штейнберг и др., 1993; Аптикаев, 2001; Чернов, 1989] и заключался, соответственно, в повышении и понижении высокочастотных ветвей спектров (например, в области частот, с которыми обычно связаны пиковые ускорения грунта (PGA), в среднем на 13%). При построении низкочастотных ветвей спектров принято, что все землетрясения (В – С, В и С) с $M = 8,0$ на частотах $f = 0,28-1,3$ Гц имеют примерно одинаковые спектры. С уменьшением M уровень спектра в среднем по диапазону $M = 3,0-8,0$ понижается в соответствии с выражениями:

$$\overline{\beta_M} = -0,439 \lg f + 0,657 \text{ для взбросов} \quad (9)$$

$$\overline{\beta_M} = -0,327 \lg f + 0,519 \text{ для сдвигов} \quad (10)$$

В выражениях (9) и (10) использованы те же обозначения, что и в выражении (2). Коэффициенты нелинейности внутри рассматриваемого диапазона магнитуд – k_β , также рассчитываются по выражениям (7).

Базовые оценки коэффициентов затухания спектра с расстоянием $n(f)$ (см. выражение (1)) получены усреднением всех имеющиеся у нас данных без расчленения территорий по сейсмогеологическим условиям. Исходя из этого принято, что данные оценки величин $n(f)$ характеризуют среднюю скорость затухания сейсмических колебаний в земной коре. В результате получено, что в высокочастотной

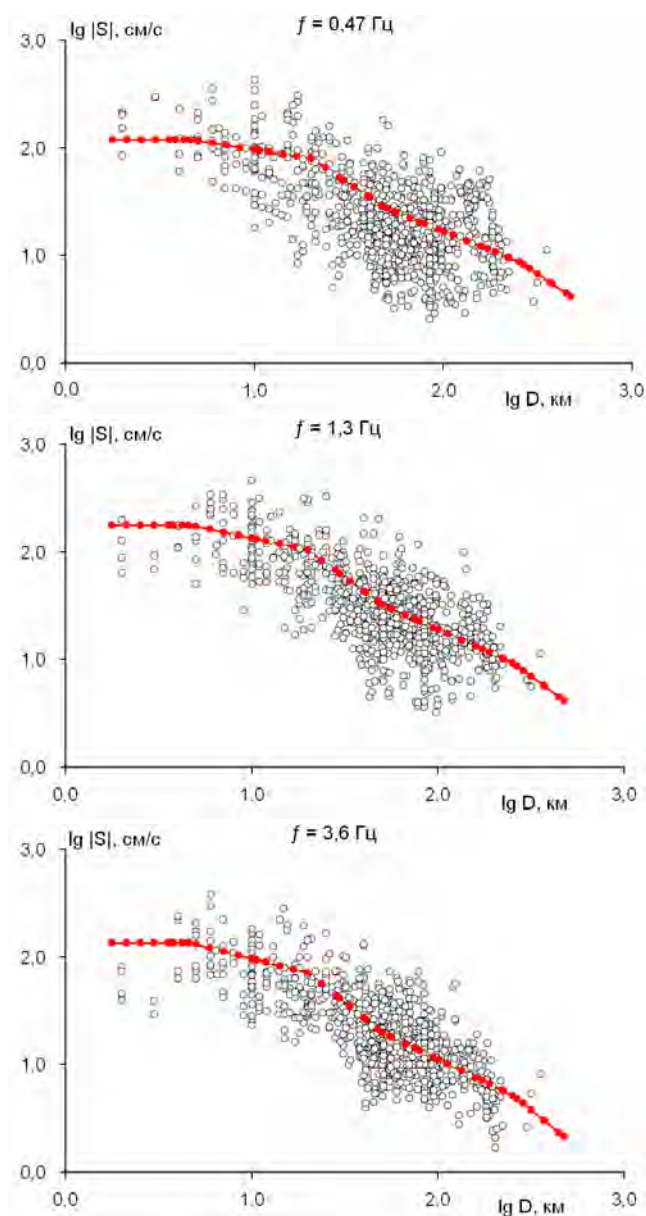


Рис.4. Примеры сопоставления расчетных и реальных функций затухания уровней спектральной плотности Фурье ускорений колебаний грунта ($|S|$) с расстоянием до очага (D) для разных спектральных составляющих (f) при землетрясениях с $M \approx 7,0$: пунктир – наиболее вероятные значения, соответствующие модели $|S|$ (M, D, f); настоящего исследования; кружки – зарегистрированные при реальных землетрясениях

части спектра (на частотах, больших угловой частоты спектра по Бруну – f_c) не зависят от магнитуды и могут определяться из выражения:

$$n = \begin{cases} -0,253 \lg f - 1,250 & \text{при } f \leq 3,6 \text{ Гц} \\ -0,478 \lg f - 1,115 & \text{при } 3,6 \leq f \leq 10 \text{ Гц} \\ -1,128 \lg f - 0,473 & \text{при } f \geq 10 \text{ Гц} \end{cases} \quad (11)$$

где $n = D \lg |S| / DD$. На частотах $f < f_c$ затухание $n(f) = const$ и равно затуханию на частоте f_c .

Коэффициенты промежуточной зоны c_1 и c_0 в выражении (1) определены равными 0,767 и 0,624, соответственно. Коэффициент kn , определяющий уменьшение скорости затухания спектра в подзоне дальней зоны ($D = 50-250$ км) принят равным 0,60. Величины $\lg r'_0$ и $\lg r_0$ из выражения (1) определены: для $M = 8,0$ равными 0,762 и 1,400, соответственно; для $M = 7,0$ – 0,662 и 1,300; для $M = 6,0$ – 0,535 и 1,141; для $M = 5,0$ – 0,382 и 0,925; для $M = 4,0$ – 0,153 и 0,640; для $M = 3,0$ – 0,15 и 0,300. Для дробных зна-

чений M величины r'_0 и r_0 получаются интерполяцией. Стандартные отклонения в величинах $\lg|S|$ для всех M , D и f могут оцениваться как $s_{\lg|S|} \approx 0,30$.

Выполненные оценки $|S|(M, D, f)$ для ближней, промежуточной и дальней зон землетрясений относятся к «средним» грунтовым условиям или к грунтам II категории СНиП по сейсмическим свойствам. Коэффициенты затухания спектра с расстоянием приняты одинаковыми для землетрясений с разными механизмами очага (В – С, В и С).

На рис. 4 приведены примеры наиболее вероятных значений $|S|(D)$ на разных частотах, рассчитанных в соответствии с разработанной моделью для землетрясений взбросо-сдвигового типа с $M = 7,0$ в «средних» сейсмогеологических условиях. Здесь же приведены массивы параметризованных спектров реальных землетрясений с $M = 6,7-7,3$ (статистически наиболее представительной группы, включающей 880 спектров). Сопоставление расчетных и реальных значений $|S|(f, D)$ показывает их удовлетворительную сходимость, свидетельствующую о достаточной надежности проведенных построений.

Заключение

Подводя итог выполненным исследованиям, дадим общую характеристику выполненным разработкам, акцентируя внимание на их преимуществах и недостатках, а также перспективах дальнейшего развития.

Главный результат – разработка усовершенствованной расчетной модели колебаний грунта при возможных сильных землетрясениях. Получаемая по этой модели вероятностная оценка объединяет несколько относительно самостоятельных элементов. Эти элементы представляют собой количественные модели энергетических, геометрических и других характеристиках потенциально опасных очагов землетрясений, особенностей сейсмического излучения из них и закономерностей изменения параметров колебаний грунта с расстоянием, трансформирующего действия локальных грунтовых условий и др. Корректный количественный учет широкого набора природных факторов, определяющих уровень и вероятность сейсмических воздействий, позволяет повысить точность прогнозных оценок и дает возможность эффективного применения разработанной модели в различных практических задачах – проектировании отдельных объектов разной степени ответственности (включая и особо ответственные объекты), сейсмическое районирований разных масштабов (ОСР, ДСР, СМР), оценки сейсмического риска.

Моделью предусмотрено, что отдельные «элементарные» составляющие модели (зоны ВОЗ, параметры очагов, грунтовые условия и др.) могут изменяться в широких пределах, модернизироваться или заменяться на альтернативные по мере поступления новых данных. Расчетные схемы дают принципиальную возможность производить расчеты широкого набора используемых в инженерной практике динамических параметров сейсмических колебаний – амплитуд, спектров, длительностей, акселерограмм и др. Без принципиальных изменений эти схемы могут быть использованы при создании модификаций расчетных моделей для: прогноза не только параметров ускорений, но и других кинематических характеристик (скоростей и смещений колебаний грунта). При этом разработанные расчетные схемы ориентированы на использование реально имеющихся исходных данных по сейсмотектонике, инженерной геологии, сильным движениям. Вышесказанное свиде-

тельствует о том, что разработанные модели являются в достаточной степени универсальными, гибкими и способными к совершенствованию.

Опыт практического использования разработанной модели показал ее высокую эффективность в различных сеймотектонических условиях – в орогенных и платформенных областях, а также в переходных зонах между ними.

В то же время следует подчеркнуть, что разработанная модель сейсмических воздействий является лишь одним из этапов или вариантов в ряду возможных решений, которые в дальнейшем должны совершенствоваться, детализироваться и уточняться. Так важным условием эффективности использования описанных методов является наличие необходимого минимума данных о характеристиках движений грунта при землетрясениях данного района. Таких данных обычно не хватает и для их получения должны быть выполнены специальные исследования. В данной работе этот этап рассматривается в неполном виде. Специально не рассмотрены также вопросы прогнозирования интегральных вероятностных оценок неамплитудных параметров движений грунта (длительностей и периодов), например, при помощи двумерных функций распределения. Это также следует сделать в дальнейшем. Необходимо также в последующих работах более подробно рассмотреть модели для вероятностного описания реакции разных типов грунтов при потенциально опасных землетрясениях.

Литература

1. Аптикаев Ф. Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях (сейсмические воздействия) // Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора наук. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – 47 с.
2. Ельченинова О. Н. Прогнозирование спектров землетрясений по макросейсмическим данным // Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Фонды ОИФЗ РАН. – Южно-Сахалинск – Москва. – 2000. – 162 с.
3. Научно-технический отчет по теме: Уточнение сейсмичности и оценки сейсмического риска для г. Нефтекумск. Научн. рук. и отв. исп. Ю. К. Чернов и Б. Ф. Галай. Фонды ФГУП СКИГЦ. – Ставрополь, декабрь 2000. – 166 с.
3. Разработка расчетных моделей сейсмических воздействий для строительного проектирования с учетом неопределенности и неполноты сейсмологических данных о спектральных и временных параметрах сейсмических движений грунта. Научн. рук. Ю. К. Чернов. Отчет о НИР. Фонды СКИГЦ Госстроя России. Государственный контракт № 16-05-06/03 от 10.06.2003 г. – Ставрополь. – 2003. – 142 с.
4. Разработка комплексной методики оценки вероятных сейсмических воздействий, сейсмической опасности и сейсмического риска (на примере районов Северного Кавказа и Сахалина. Научн. рук. Ю. К. Чернов. Отчет о НИР. Фонды СКИГЦ Госстроя России. Государственный контракт № 16-06-31/04 от 11 июня 2004 г. – Ставрополь. – 2004. – 251 с.
5. Соколов В. Ю. Спектры ускорений колебаний грунта при землетрясениях на Кавказе // Физика Земли, № 8. – М.: Наука, 1998. – С. 56-69.
6. Уточнение сейсмических условий и проведение расчетов сейсмостойкости плотины и башни водосброса г/у Тилездит в Алжире. 1 этап работ «Оценка сеймотектонических условий района, определение параметров расчетных сейсмических воздействий». Фонды ГП «Зарубежводстрой». – Москва. – 1999. – 63 с.

7. Чернов Ю.К. Закономерности изменения спектра в ближней зоне землетрясения // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 25. – М.: Наука, 1984. – С. 15-28.
8. Чернов Ю.К. Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Изд-во «ФАН», 1989. – 295 с.
9. Чернов Ю.К. Методика и вероятностные оценки сейсмической опасности территорий Сахалина, Курильских островов и Приморья // Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией. Том VI. Проблемы сейсмической опасности Дальневосточного региона. – Южно-Сахалинск. – 1997. – С. 198-237.
10. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю. Оценка спектров колебаний грунта при землетрясениях по их макросейсмическому полю для прогнозирования расчетных сейсмических воздействий // Инженерная геология. – М.: ОАО ПНИИИС, 2008. – С. 42-52.
11. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю. Прогнозирование возможных сейсмических воздействий с учетом региональных и локальных особенностей территории для проектирования и оценок сейсмического риска // Геология и геофизика юга России. – 2011. – № 1. – С.70-81.
12. Чернов Ю.К., Соколов В.Ю. Количественные оценки возможных сейсмических воздействий на северо-востоке о. Сахалин. Препринт ИМГиГ ДВО РАН. – Южно-Сахалинск. 1991. – 54 с.
13. Чернов А.Ю. Геоэкологическая оценка сейсмической опасности и риска на примере застраиваемых территорий центрального Предкавказья // Дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Фонды СКФГУ. – Ставрополь. – 2016. – 160 с.
14. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Аптикаев Ф.Ф. и др. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. – М.: Наука, 1993. – С. 5-94.
15. Boore D.M., Joyner W.B., Fumal T.E. Estimation of Response Spectra and Peak Accelerations From Western North American Earthquake: // Interim Report. U.S. Geological Survey Open – File Report, 1993. – P. 93-509.
16. Campbell K.W. and Bozorgnia Y. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration From Worldwide Accelerograms Recorded from 1957 to 1993 // Proceedings, Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, July 10-14 1994 Chicago. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, v. III. – 1994. – P. 283-292.
17. Jimenez M. H., Garcia-Fernandez M. et al. Seismic hazard assessment in the Ibero-Maghreb region // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – Vol. 42, N 6. – December 1999. – P. 1057-1065.
18. Sadigh K., Egan J. and Youngs R. Specification of Ground Motion for Seismic Design of Long Period Structures. Earthquake Notes 57:13.2.1986.
19. Ulomov V.I. et al. Seismic hazard of Northern Eurasia // The global seismic hazard assessment program (GSHAP) 1992-1999. Annali di Geofisica. – Vol. 42, N 6. – December 1999. – P. 1023-1038.

DOI: 10.23671/VNC.2017.2.9496

PROBABILISTIC MODEL SOF SEISMIC EFFECTS PREDICTION FOR SEISMIC HAZARD IN ENGINEERING PURPOSES FORECASTING

© 2017 Y. K. Chernov¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., A. Y. Chernov²

¹Geophysical institute VSC RAS, Russia, 362002, RNO-Alania, Vladikavkaz, Markov street, 93a, e-mail: chenta-26@mail.ru;

²Institute of Construction in the North-Caucasian Federal University, Russia, 355029, Stavropol Krai, Stavropol, Kulakov str., 2

Probability models of peak acceleration, spectra and other strong motion parameters based on statistical analysis of large amounts of data on the instrumental registration is proposed.

Models can increase the accuracy and reliability of projections at the regional and local level, through better integration of potentially hazardous characteristics of earthquakes and geological environment properties, including local ground conditions.

Keywords: strong earthquake, seismic hazard, seismic effects, probable seismic impact, ground peak acceleration, spectra, periods, duration.