

УДК 550.34

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА ПРИ ПЕТРОПАВЛОВСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ 24.11.1971 ($M = 7.6$)

© 2009 г. А. А. Гусев^{1,2}, Е. М. Гусева², В. М. Павлов²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²Камчатский филиал ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию 09.09.2008 г.

На примере сильного землетрясения 24 ноября 1971 г. с очагом вблизи Петропавловска-Камчатского опробована новая методика для моделирования сильных движений грунта в широкой полосе частот. В методике используются сейсмологически обоснованные модели излучателя-очага и упругой среды. Очаг представлен решеткой точечных излучателей-дислокаций со случайными сейсмическими моментами (амплитудами) и случайными временными функциями. Для описания распространения волн и остаточных перемещений слоистой среды разработан новый метод расчета функций Грина. Методика применена для имитации горизонтального движения грунта, зарегистрированного прибором С5С-ИСО при сильном землетрясении 24.11.1971 г. с очагом вблизи Петропавловска-Камчатского (глубина 105 км). Положение гипоцентра, размеры и расположение разрыва и “механизм очага” считались известными заранее. Путем подбора длительности очагового процесса и всего двух спектральных параметров удалось успешно промоделировать основные характеристики колебаний грунта: амплитуды ускорения, скорости и смещения грунта, их спектр Фурье, длительность колебаний, спектр реакции. Особенностью очага является необычно высокий уровень высокочастотного излучения, вероятно связанный с внутриплитным расположением очага.

Ключевые слова: очаг землетрясения, акселерограмма, моделирование, Камчатка.

PACS: 91.30.Ab

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на многолетние исследования, реалистическое имитационное моделирование сильных движений грунта при землетрясении остается трудной задачей. В настоящей работе описаны принципы и пример опробования новой методики, представляющей определенный шаг в этом направлении. Методика ориентирована на решение ограниченной задачи – моделирования движения скального грунта от очага землетрясения большой магнитуды в широкой полосе частот в рамках модели слоистой слабо неупругой среды. В ряде инженерно-сейсмологических ситуаций данные ограничены несущественны.

В то время как описание распространения упругого возмущения от очага является принципиально хорошо понятной задачей математической физики, описание очага-излучателя вызывает ряд трудных вопросов. В ряде работ, восходящих к классическим статьям Кострова, очаг рассматривается как динамическая самопроизвольно распространяющаяся трещина в упругой среде. Этот концептуально весьма привлекательный подход встретил, однако, ряд трудностей. Пока не удалось просто объяснить наблюдаемую локализацию процесса скольжения в узкой бегущей полосе. Другой проблемой является невозможность предсказать наблюдаемое поведение

очаговых спектров на высоких частотах; в то же время именно эта часть спектра интересует инженеров в первую очередь.

Для задач инженерной сейсмологии работоспособной альтернативой является полуэмпирическое описание излучателя, когда комбинируют теоретические соображения с обобщением наблюдений. Первым шагом в этом направлении явилось описание семейства очаговых спектров для очагов разной магнитуды, сначала в предположении подобия [Haskell, 1966; Aki, 1967; Brune 1970], а затем с учетом его нарушения [Gusev, 1983; Гусев, 1984; Papageorgiou, Aki, 1985]. Следующий важный шаг - использование многоэлементных моделей очагов. Наиболее развита модель очага большого землетрясения в виде набора однотипных [Papageorgiou, Aki, 1983] или разнообразных [Blandford, 1975; Kouyama, 1985], малых изолированных трещин или дислокаций; но предлагалась и модель единого разлома с субочагами типа прочных пятен (“asperity”) [Гусев, 1988; Gusev, 1989]. С помощью моделей из субочагов-трещин удавалось неплохо описать совокупность материалов по сильным движениям. Но надо отметить, что эти модели неудовлетворительны тектонофизически – в них, по существу, исключено долговременное скольжение по разлому, что противоречит фактам сейсмогеологии.

Хорошая модель должна учитывать, с одной стороны, всю информацию, полученную из инверсий очагов: степень локализации скольжения, волночисловые спектры финальной подвижки и др. С другой стороны, она должна успешно имитировать высокочастотные параметры, известные из анализа акселерограмм: форму спектров Фурье, амплитуды и статистику пиков ускорения и скорости, длительность акселерограмм. Пока лишь полуэмпирические модели позволяют учитывать перечисленные факторы. Такого рода модель и описывается далее. Использован оригинальный вариант стохастической модели очага с множеством точечных излучателей с подходящими временными функциями, расположенными в виде решетки. Временные функции индивидуальных излучателей комбинируются с соответствующими функциями Грина, описывающими распространение волн в среде; затем результаты суммируются.

Параметры, описывающие конкретный очаг, можно разделить на две основные группы: физические параметры, которые фиксируются в конкретном расчете, и “случайные параметры”. Варьирование физических параметров позволяет учитывать сейсмологическую специфику очага, связанную с вариациями природных факторов (сброшенное напряжение, глубина очага, скорость и направление вспарывания и т.п.). Подбор физических параметров – необходимый элемент при моделировании реальных движений грунта. “Случайные параметры” – это начальные значения датчиков случайных чисел (ДСЧ), варьирование которых определяет чисто стохастическую вариабельность. Вносимый этими параметрами разброс определяет реально достижимое качество подгонки.

Для опробования системы моделирования в работе проводится имитация движения грунта, зарегистрированного при сильном (магнитуда $M_w = 7.6$) промежуточном (глубина гипоцентра 105 км) землетрясении 24 ноября 1971 г. вблизи Петропавловска-Камчатского, с интенсивностью в точке регистрации – 5–6 баллов.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование очага. За основу модели очага-разлома взята классическая модель по [Haskell, 1964; 1966], где очаг представляется как прямоугольная сдвиговая дислокация, которая возникает путем одностороннего распространения прямолинейного фронта вспарывания вдоль длинной стороны прямоугольника. В каждой точке площадки случайный процесс взаимного скольжения бортов разлома начинается в момент прихода в эту точку фронта вспарывания и продолжается в течение определенного промежутка времени – “времени нарастания” (rise time). Эта модель далее генерализована следующим образом. Финальная (окончательная) подвижка, вместо постоянной, представляет

собой случайную функцию двух переменных с заданным двумерным волночисловым спектром мощности. Фронт вспарывания не прямолинейный, а круговой, точка начала вспарывания (то есть точка зарождения трещины-дислокации) произвольна, а скорость распространения фронта вспарывания – случайная функция, представляемая как функция времени или пройденного фронтом расстояния. Важнейшие свойства принятой модели таковы:

- очаг представляется как решетка точечных субисточников-дислокаций с идентичной ориентировкой векторов скольжения и нормали;
- каждый субисточник включается в момент прихода к нему фронта вспарывания;
- временные функции субисточников случайны, негауссовы и взаимно не коррелированы;
- сейсмический момент M_{0i} каждого субисточника определяется упомянутой выше функцией распределения финального скачка смещения по площадке очага.

Временные функции субисточников $\dot{M}_{0i}(t)$ всегда неотрицательны и моделируются по Монте-Карло с учетом их заданной длительности и заданного интеграла (равного M_{0i}). Количество модельных субисточников в принципе произвольно и для случая приемника вблизи очага может достигать многих сотен. Сами модельные субисточники не имеют содержательного тектонофизического смысла и служат лишь инструментом численного описания очага.

В методике учитывается обычно имеющая место негауссовость, “тяжелохвостость” для основных функций распределения, а именно для значений сейсмических моментов субисточников и для амплитуд временной функции отдельного субисточника. Для этих величин принимается логнормальный закон. Спектр случайной функции финальной подвижки и спектр огибающей временной функции субисточника принимаются степенными. Как известно, гауссова случайная функция со степенным спектром после потенцирования превращается в положительную функцию – логнормальный мультифрактал [Schmitt, Marsan, 2001]. В нашем случае и распределение сейсмического момента, и временная функция субисточника относятся к этому классу.

Спектры субисточников подбираются исходя из требования, чтобы амплитудный спектр излучения очага был близок к заданному (“целевому”). “Целевой” спектр задается на основе закона масштабирования (scaling law) с учетом сейсмического момента M_0 и других параметров. Подобие спектров в узком смысле не предполагается, в соответствии с эмпирикой.

Расчет реакции среды. Для расчета вклада каждого субисточника в движение грунта в приемнике использована оригинальная эффективная методика расчета синтетических сейсмограмм

[Pavlov, 2002; Павлов, 2006]. Методика позволяет синтезировать сейсмограммы (функции Грина) от точечного силового диполя с симметричным тензором сейсмического момента, размещенного в слоистом упругом полупространстве. Следуя работе Алексеева и Михайленко [1978], решение представляется в виде рядов по горизонтальным функциям с дискретными значениями волнового числа – корнями функций Бесселя. Для того чтобы определить коэффициенты рядов (“вертикальные функции”), решаются обыкновенные дифференциальные уравнения по глубине z (одно уравнение для SH и два сцепленных уравнения для P-SV). Уравнения решаются аналитически с помощью введения импедансов. Для SH волн импеданс – скалярная функция z и при умножении на коэффициент ряда для вектора смещения дает соответствующий коэффициент ряда для вектора напряжения. Для P-SV волн импеданс является матричной функцией z и определяется аналогично. Сначала рассчитывается импеданс, затем с помощью импеданса вычисляются искомые вертикальные функции. Расчеты производятся по аналитическим формулам, не содержащим экспонент, превышающих по модулю единицу, что обеспечивает численную устойчивость. Примененный метод обеспечивает аккуратное широкополосное представление смещений от статических до высокочастотных членов.

Слабое поглощение в среде может учитываться путем введения мнимых добавок к скоростям упругих волн. Однако на этом пути сложно учесть зависимость потерь от частоты. Поскольку этот фактор является существенным при широкополосном (0–20 Гц) моделировании, в данной работе использовали более примитивный подход. Потери считались зависящими только от гипоцентрального расстояния r , и считалось, что потери для амплитудного спектра имеют вид:

$$A(f)/A_0(f) = \exp(-\pi f(k_0 + r/c_S Q_S(f))), \quad (1)$$

где k_0 – параметр фиксированных потерь под станцией, r – длина луча, c_S и Q_S – средние вдоль луча значения скорости и добротности для S-волн. При этом в низкочастотной части спектра, где поглощение мало, неточности его оценки вообще мало существенны. Поглощение группы P-волн при таком способе расчета искусственно завышено; но влияние этой неточности на результаты невелико из-за малости относительных амплитуд P-волн.

Для получения каждой компоненты движения грунта в приемнике сначала для каждого субисточника выполняется свертка его временной функции с соответствующей функцией Грина (что дает вклад данного субисточника в движение в приемнике); затем вклады от всех субисточников суммируются.

Моделирующая программа. Список параметров очага и среды. Описанные алгоритмы реализованы

в виде системы моделирования – программного пакета АКССИН. Ее базовая версия описана в [Gusev, Pavlov, 2006; далее ссылаемся как на GP06]. Приведем список основных параметров очага и среды, подаваемых на вход системы моделирования.

1. Координаты и глубина центра прямоугольного разлома-очага (“макросейсмический гипоцентр”), его длина L , ширина W и моментная магнитуда M_w .

2. Углы простираения, падения и скольжения площадки очага (“механизм очага”).

3. Число субисточников по длине n_L и ширине n_W (всего $n_L n_W$ субисточников).

4. Положение точки старта (гипоцентра) вдоль L и W .

5. Параметры случайной безразмерной скорости разрыва: среднее $Mach$, полуразмах DV мгновенных значений. Собственно средняя скорость равна $v_m = Mach \cdot c_S$.

6. Безразмерное время нарастания C_H как доля времени распространения разрыва T_{pr} ($T_{rise} = C_H T_{pr}$). Считалось, что T_{rise} – это длительность основной части процесса скольжения, его полное время равно приблизительно $2T_{rise}$.

7. Параметры CV_t и CV_{xy} – определяют степень негауссовости упомянутых логнормальных законов – для функций субочагов и функции финальной подвижки.

8. Показатель s в степенном законе для изотропного двумерного амплитудного спектра финальной подвижки вида $S(k_x, k_y) \sim (k_x^2 + k_y^2)^{-s/2}$.

9. Начальные значения ДСЧ: для финальной подвижки, для временных функций субисточников, для мгновенных значений скорости испарывания.

10. Конкретный закон масштабирования очаговых спектров $M_0(f|M_w)$, табулированный или в формульном виде; набор параметров для фиксации конкретного спектра.

11. Параметры слоистой среды и приемников: координаты и значения k_0 для приемников, вертикальный профиль скоростей и плотности, $Q_S(f)$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕТРОПАВЛОВСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Петропавловское землетрясение 24.11.1971 г. [Гусев и др., 1975] (рис. 1, табл. 1), с магнитудой $M_s = 7.2$, имело в г. Петропавловск-Камчатский (примерно в 125 км от гипоцентра) интенсивность 7 баллов на среднем грунте и 5–6 баллов в пункте регистрации. На рис. 1 приведены эпицентры слабых форшоков и афтершоков, согласно каталогу местной сейсмической сети (<http://www.emsd.iks.ru>). Область эпицентров фиксирует азимут простираения очага – примерно 45°СВ, под небольшим углом к

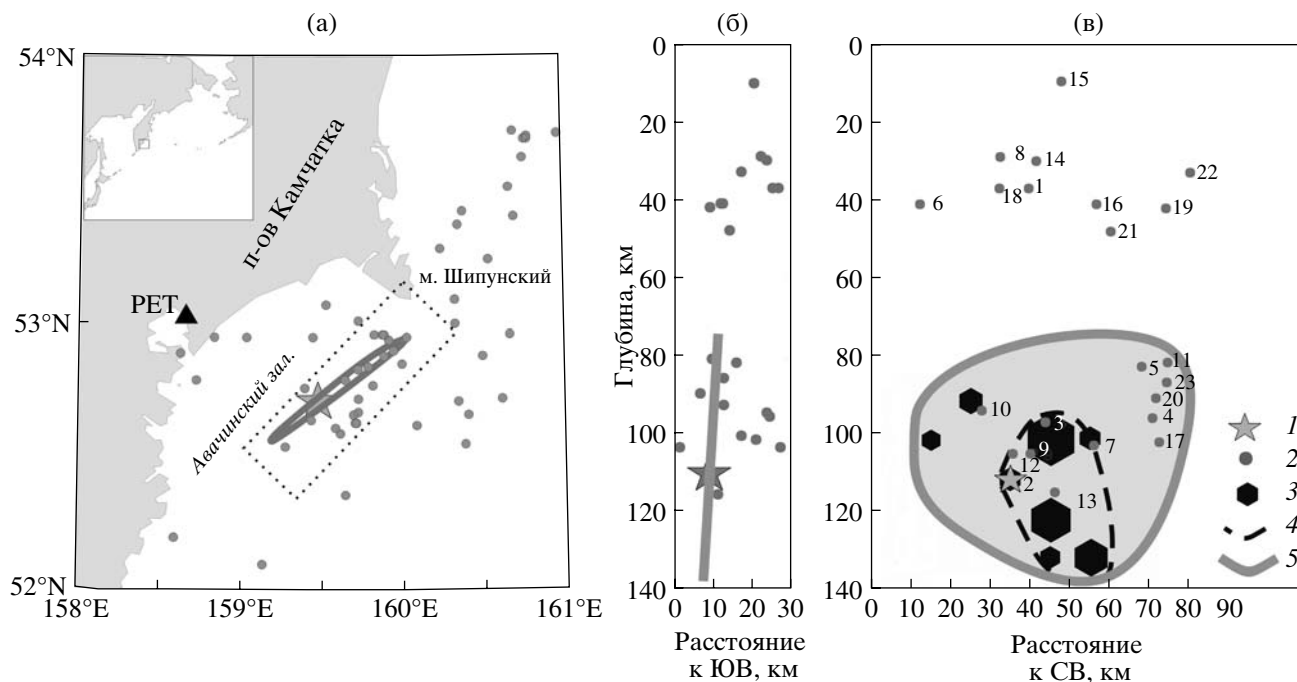


Рис. 1. Район исследований и геометрия площадки очага: (а) – карта-схема; (б) и (в) – разрезы в пределах пунктирного прямоугольника в (а) вдоль узкой и широкой его сторон. Обозначения: 1 – гипоцентр основного толчка; 2 – гипоцентры форшока (номер 1, опережение 24 мин) и афтершоков за первые 2 месяца по региональному каталогу; 3 – субочаги – компоненты очагового процесса по FK87; 4 – область очага к концу 15 с по FK87; 5 – площадка очага, принятая в данной работе. Треугольник – сейсмическая станция “Петропавловск” в г. Петропавловск-Камчатский. Расположение района исследований см. на врезке.

ориентировке структур Курило-Камчатской зоны (30° – 35°). На рис. 1 также нанесена локализация субочагов – этапов развития разрыва в очаге, согласно инверсии телесейсмических P -волн, выполненной в детальной работе [Fukao, Kikuchi, 1987; далее цитируется как FK87]. По сводным данным нанесена ве-

роятная граница площадки очага. Степень надежности ее рисовки ограничена. Во-первых, нижняя часть площадки очага, отрисованная только по результатам FK87, заходит на 15–20 км в асейсмичный слой океанической плиты. Во-вторых, форшок (№ 1) и ряд афтершоков возникли на глуби-

Таблица 1. Опубликованные параметры очага

№	ϕ, λ°	$h, \text{ км}$	$L, \text{ км}$	$W, \text{ км}$	$d, \text{ с}$	$v_r, \text{ км/с}$	ϕ_s	δ_s	λ_s	M_w	Ссылка
1	52.7 159.6	100г	70 ⁽¹⁾	–	–	–	60	80	85	–	[Гусев и др., 1975]
2	52.77 159.66	100г	30 ⁽²⁾	30 ⁽²⁾	6–8 ⁽³⁾	1.2, 4.3 ⁽⁴⁾	40	88	110	7.3–7.5P, 7.7R	[Зобин, 1984; Зобин и др., 1988]
3	52.9 152.2	112г 95–130д	35–40 ⁽⁵⁾	45	14, 50 ⁽⁵⁾	1.1	43	83	90	7.2P	[Fukao, Kikuchi, 1987]
4	52.77 159.66ц	95ц	–	–	12	–	165 ⁽⁶⁾	10 ⁽⁶⁾	40 ⁽⁶⁾	7.1P	[Gorbatov et al., 1997]
5	52.71 159.47 52.79 159.59ц	105г 75–135д	70 (40СВ, 30ЮЗ)	60	45	1.1	43	83	120	7.65	наст. раб.

ϕ, λ – широта и долгота эпицентра и центра площадки очага (помечено “ц”), h – глубина инструментального гипоцентра (“г”), центра тяжести или “центроида” (“ц”) или диапазон глубин протяженного очага (“д”); L – горизонтальная протяженность очага и длины его плеч к СВ и ЮЗ от эпицентра; W – вертикальная протяженность очага, в данном случае почти совпадающая с его шириной; d – длительность очагового процесса или его этапов; v_r – скорость испарывания; $\phi_s, \delta_s, \lambda_s$ – азимут простираения и угол падения принятой плоскости разрыва и соответствующий угол скольжения; M_w – моментная магнитуда по волнам P (P) или Релея (R). Примечания: (1) – протяженность цепочки афтершоков. (2) наша оценка снизу по расстоянию между выраженными субочагами. (3) – относительное запаздывание между субочагами и (4) варианты оценки скорости на этой основе. (5) значения размера и длительности для начального этапа и для процесса в целом. (6) эту (пологую) нодальную плоскость все другие авторы сочли вспомогательной.

нах $H = 20\text{--}40$ км над предполагаемым очагом, и наше решение о том, что очаг не выходил на эти глубины, имеет предположительный характер. Мы исходили из известной тенденции, что лишь очаги промежуточных глубин (в отличие от мелкофокусных) формируют малое число афтершоков. Поэтому малое число слабых афтершоков в верхней группе ($H = 20\text{--}40$ км) противоречит идее о выходе на этот уровень разрыва-очага: в таком случае здесь следовало бы ожидать в сотни раз большее число афтершоков. Эта группа скорее имеет характер вызванной активизации слабой сейсмичности вблизи, но не внутри очага. (Позже, в марте–августе 1972 г., в этой же зоне возник слабый рой землетрясений, возможно, обрисовавший зону асейсмического скольжения, спровоцированного очагом 1971 г.)

Обсудим геометрию и кинематику очага на основе предыдущих работ (см. табл. 1). По FK87, сначала очаг развивался “веерообразно”: асимметрично в плане, к СВ и одновременно примерно симметрично вверх и вниз. Эта фаза развития очага, длилась до 12–15 с [Gorbatov et al., 1997; FK87], и охватила расстояние около 30 км в плане и 20–40 км по вертикали. Дальнейшее развитие прослеживается с большой неопределенностью. Судя по расположению афтершоков, финальный разрыв имеет примерно изометричную форму, с геометрическим центром вблизи гипоцентра. Финальный размер очага в плане около 70 км, а по вертикали около 60 км. Общая длительность очагового процесса по FK87 – до 50 с. Скорость распространения разрыва по FK87 и по рис. 1 – около 1.0–1.1 км/с. Это – низкая величина: число Маха $Mach = v_r/c_s$, составляет всего 0.23–0.25, против типичных 0.6–0.8.

Механизм очага приняли по FK87: близвертикальный взброс с воздыманием ЮВ крыла. Исходный вариант угла скольжения – 90° – противоречил картине записи, принятое значение 110° нашли подбором (см. ниже). Для значения моментной магнитуды также имеются варианты в довольно широком интервале. По данным волн P , получались оценки M_w от 7.1 до 7.5. Низкие оценки соответствуют учету лишь первых 15 с движения, так что больших противоречий здесь нет. По волнам Релея имеются оценки до $M_w = 7.7$. Моделирование начали, задав $M_w = 7.5$, но как окончательное было принято $M_w = 7.65$ (см. ниже).

Опишем принятую в расчетах модель очага. Разрыв – прямоугольник 70×60 км, охватывающий гладкий контур (рис. 1в). Гипоцентр, среднюю скорость вспарывания, механизм очага и сейсмический момент см. в табл. 1. Были жестко заданы также многие параметры очага, а именно: $DV = 0.75$, $C_H = 0.1$, $L = 70$ км, $W = 60$ км, $CV_l = 0.7$, $CV_{xy} = 0.85$, $s = 1.2$, при этом учитывали опыт успешного моделирования записей сразу 19 станций вблизи очага, проведенного в GP06. Скоростной разрез среды (табл. 2) принят по обычной камчатской модели Кузина, но

Таблица 2. Принятый скоростной разрез для ст. РЕТ

$h_{\text{кровли}}$, км	ρ , г/см ³	c_p , км/с	c_s , км/с
0.0	2.3	1.7	0.95
0.025	2.5	2.7	1.5
0.5	2.5	4	2.22
5	2.7	5.8	3.35
20	2.7	6.7	3.87
35	3.3	7.8	4.5
120	3.3	8.1	4.74

верхи разреза охарактеризованы детальнее. Модель затухания принята в виде $Q_s(f) = 195 f^{0.4}$ при $f > 1$ Гц, $Q_s(f) = \text{const} = 195$ при $f < 1$ Гц, $\kappa_{0s} = 0.015$ с. Эта модель выбрана на основе ранее изученных свойств затухания вблизи Петропавловска [Гусев, Шумилина, 1999; Абубакиров, 2005]. Модель была уточнена по записям близких землетрясений с $S\text{--}P < 3$ с, одновременно получили оценку κ_{0s} .

Результаты вариантных модельных расчетов сравнивали с записью Петропавловского землетрясения на сейсмической станции Петропавловск-Камчатский (РЕТ) [Штейнберг и др., 1975]; там же см. описание аппаратуры. Грунтовые условия – интрузия габбро-диабазов. Две горизонтальные компоненты движения были записаны на фотопленку велосиграфом С5С-ИСО. Качество этой уникальной записи было далеко от идеала. В частности, существенной проблемой была неравномерность протяжки пленки в осциллографе при колебаниях грунта и подвесной системы осциллографа. Этот дефект в основном исправлен путем применения при цифровке линейной интерполяции моментов времени в пределах каждого интервала между метками времени на пленке (алгоритм реализован А.Г. Петухиным в рамках методики [Гусев и др., 2006]). В конечном счете обеспечивается относительно надежная регистрация полосы частот от 0.05–0.07 до 15–25 Гц.

ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ниже приводятся результаты моделирования колебаний грунта при землетрясении 24.11.1971 г. с использованием программного пакета АКССИН. Опробование методики проводилось путем сравнения модельных движений грунта и реальных записей землетрясения. Для лучшего уяснения процедуры моделирования мы несколько нарушим при изложении логическую последовательность работы: сначала проиллюстрируем методику с использованием графиков для окончательного варианта модели, с уже подобранными параметрами, а процедуру подбора параметров обсудим позже.

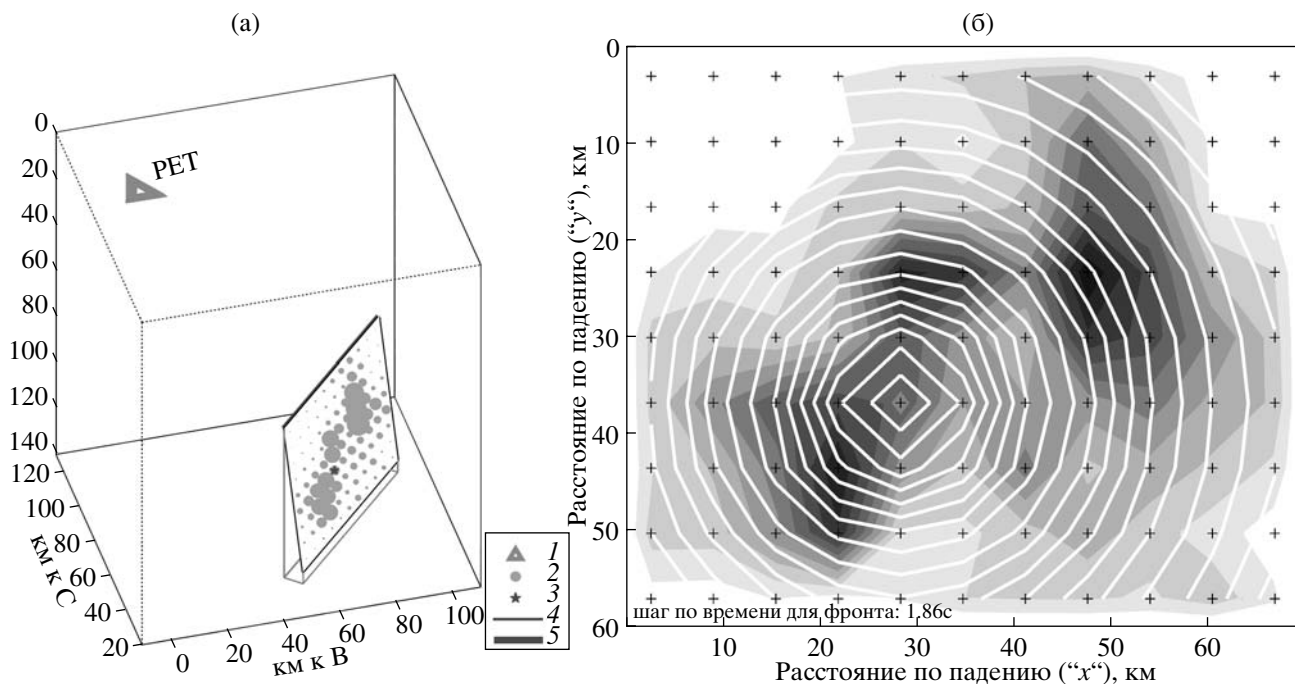


Рис. 2. Перспективный вид расположения модельного очага и ст. PET (а) и детали распределения субисточников и кинематики фронта (б) в этом очаге. Обозначения к (а): 1 – сейсмостанция, 2 – субисточник, 3 – точка старта-гипоцентр, 4, 5 – края прямоугольника-очага, 5 – верхний край. Сетка субисточников принята 11×9 , их “амплитуды” (величина финальной подвижки) изображены величиной кружка на (а) и в виде уровней серого на (б). Белые контуры на (б) – положение фронта модельного разрыва каждые 1.9 с. Отклонения формы фронтов от окружностей – артефакт программы интерполяции фронтов между точечными очагами.

Результаты моделирования. Геометрия задачи и двумерное распределение финальной подвижки даны на рис. 2. Для иллюстрации методики сетку субисточников выбрали достаточно детальной: 11×9 . (Для станции на расстоянии, превышающем размер очага, подошла бы и более редкая сетка, например, 9×3). На рис. 2б следует обратить внимание на непостоянную скорость распространения разрыва. Этот фактор, как показывают численные эксперименты, дает существенный вклад в изменчивость результирующего движения.

На рис. 3 даны временные функции каждого субисточника, длительность каждой из них – около 8с – близка к $2T_{\text{rise}}$. По вертикали рисунка видно 9 групп трасс для каждого уровня по глубине, в каждой группе по 11 трасс. Для большей ясности приведена с увеличением трасса для самого раннего субочага (в гипоцентре); качественно она ничем не отличается от остальных 98 трасс. Внизу рис. 3 дана очаговая временная функция – первая производная $\dot{M}_0(t)$ от функции сейсмического момента точечного дипольного источника, эквивалентного очагу землетрясения. Форма этой кривой идентична форме сигнала смещения поперечных или продольных волн, которые были бы получены в однородной среде в дальней зоне источника приемни-

ком, расположенным на нормали к площадке очага. Эта функция – просто сумма соответствующих функций субисточников. На рис. 4 и рис. 5 сопоставлены модельные и реальные сигналы смещений, скоростей и ускорений, а также соответствующие сглаженные спектры Фурье.

При рассмотрении рис. 3, рис. 4 и рис. 5 следует учитывать следующее. Во-первых, приведенные иллюстрации отображают одну из множества однотипных моделей, генерируемых при разных начальных значениях ДСЧ и при фиксированных значениях физических параметров очага. Структура разброса между реализациями детально изучалась в GR06. Согласно этим оценкам, разброс максимальных амплитуд за счет данного фактора должен составлять около 15–25%. Во-вторых, следует иметь в виду, что примененная расчетная схема нацелена лишь на правдоподобную имитацию амплитуд, длительностей и спектральных свойств реальных колебаний. Эта задача, на наш взгляд, успешно решена. Задача же воспроизведения моделью реального движения грунта в деталях, то есть “обратная задача для очага”, не ставилась и не решалась.

Подбор параметров очага, моделирование спектра. Опишем процесс подбора параметров, который вели путем проб и ошибок. Подбирались: угол скольжения λ_s , моментная магнитуда M_w , параметр

Mach, а также два параметра, описывающие форму спектра. Что касается λ_s и M_w , то сначала попытались их зафиксировать по независимым данным: $\lambda_s = 90^\circ$ (по FK87) и $M_w = 7.5$ (компромисс по многим источникам). Однако оказалось, что этот выбор явно неудачен. Фактическое отношение наблюдаемых амплитуд смещения и скорости на компонентах СЮ и ВЗ уверенно исключает начальный вариант λ_s ; правильный вариант $\lambda_s = 110^\circ$ получается достаточно надежно (неопределенность около 5°) и почти не противоречит знакам телесейсмических *P* волн. В отношении M_w оказалось, что принятое начальное значение слишком низкое и может обеспечить наблюдаемый уровень амплитуд смещения только при весьма экзотических вариантах форм спектров. Принятое значение $M_w = 7.65$ – это, в сущности, минимальная разумная оценка. Однако значение $M_w = 7.65$ уже находится на верхней грани приемлемости с точки зрения согласования наших результатов с телесейсмическими оценками M_w , поэтому оно и было зафиксировано далее. Принятое значение параметра *Mach* = 0.24 было подобрано для получения длительности велосигранмы, близкой к наблюдаемой. Эта длительность в нашем случае определяется длительностью очагового процесса, которая в свою очередь, при зафиксированных *L*, *W* и гипоцентре, определяется как раз значением *Mach*. Отметим, что *Mach* = 0.24 находится в неожиданно хорошем согласии с оценкой из FK87, сделанной по телесейсмике.

Подбор спектров провели следующим образом. Сначала были проверены варианты очагового спектра по модели “ ω^2 ” Бруна [Brune, 1970] и из семейства [Gusev, 1983]. В обеих этих моделях очаговый спектр задается значениями M_w и сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ (двухпараметрическая модель: $\dot{M}_0(f|M_w, \Delta\sigma)$). При этом для спектров из [Gusev, 1983] учет $\Delta\sigma$ делается путем модификации исходных таблиц, см. GP06. На качественном уровне сразу стало ясно, что фактический уровень очагового спектра ускорения на высоких частотах $\ddot{M}_0(f)|_{f \gg f_c} = A_{HF}$ необычно высок, и что форма спектра далека от одногорбого, с единственной корнер-частотой, “ ω^2 ”-спектра Бруна. Двугорбые спектры из семейства [Gusev, 1983] дают несколько лучшее, но все же неприемлемое описание данных. Поэтому была использована более сложная и достаточно гибкая многопараметрическая модель двугорбого спектра в виде аналитической формулы по [Atkinson, 1993] (спектр типа “2Brune”), вида

$$\dot{M}_0(f) = M_0 \left[\frac{(1 - \varepsilon)}{1 + (f/f_a)^2} + \frac{\varepsilon}{1 + (f/f_b)^2} \right]. \quad (2)$$

Параметр f_a здесь соответствует обычной корнер-частоте f_c по Бруну. Эта формула имеет четыре параметра: M_0 ($\lg M_0 = 1.5(M_w + 10.7)$), f_a , f_b и ε .

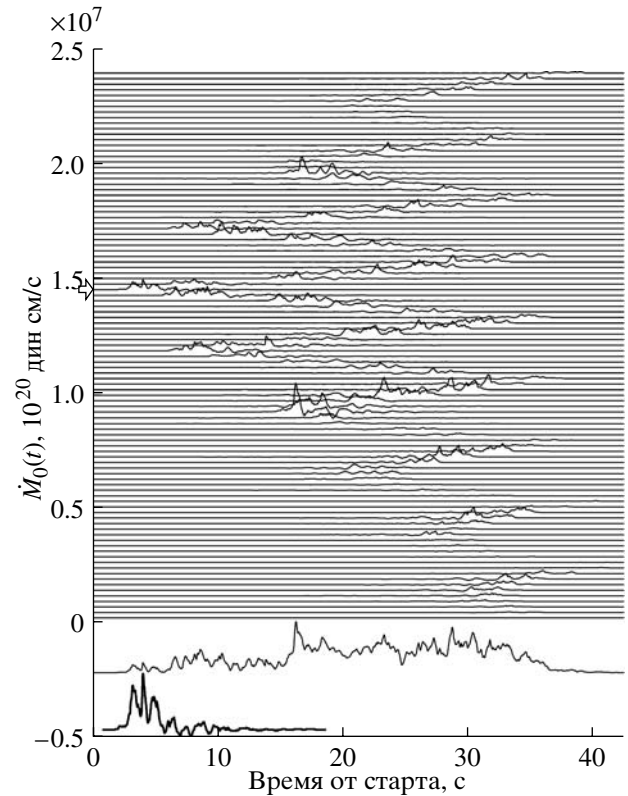


Рис. 3. Вариант очаговых временных функций ($\dot{M}_0(t)$ или “смещение”) для 99 субисточников. Внизу отдельно даны: временная функция суммарного источника и, повторно и в увеличенном масштабе, временная функция субисточника в гипоцентре (ее исходный вид помечен стрелкой).

Вместо последнего из них использовали более прозрачный параметр A_{HF} . При этом было принято, что $\lg A_{HF}$ масштабируется с $\lg M_0$ как $\lg A_{HF} = (1/3) \lg M_0 + \text{const}$, как в модели “ ω^2 ”. Ввели также безразмерный параметр $C_{ba} = f_b/f_a$. Теперь для параметра ε получаем:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_{ba}^2 - 1} \right) \left(\frac{A_{HF}}{(2\pi f_a)^2 M_0} - 1 \right). \quad (3)$$

Новый набор четырех параметров – это M_0 , f_a , C_{ba} и A_{HF} .

В этой модели принято, что в своей высокочастотной части очаговый спектр ускорения плоский, в согласии с гипотезой “ ω^2 ”, но его уровень не завязан на значение $\Delta\sigma$ [Izutani, 1984]. Выбор параметра M_w описан выше. Значение $f_a = f_c$ найдено по M_w , в соответствии со средним трендом корнер-частот семейства типичных очаговых спектров на рис. 3 из [Gusev, 1983]. Там этот тренд представлен в графическом виде, а в виде формулы может быть записан как:

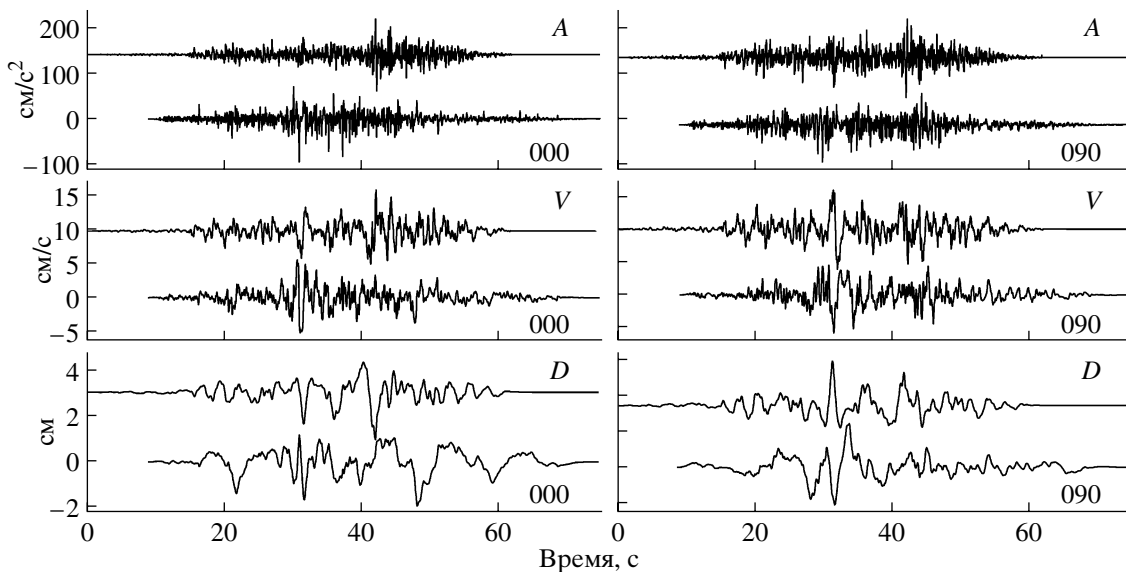


Рис. 4. Вариант временных функций – результатов моделирования движения грунта (верхняя в паре) в сравнении с наблюдаемыми записями (нижняя в паре) в едином масштабе. Как к реальным, так и к модельным сигналам применен высокочастотный фильтр с частотой среза по уровню –3дБ, равной 0.07 Гц. Относительный сдвиг начала отсчета времени реальной и модельной записи произвольный. Сверху вниз три пары графиков сигналов: ускорения, скорости и смещения. Слева – компонента NS, справа – компонента EW. Приводимые трассы смещения имеют несколько условный характер, их вид существенно зависит от выбора частоты среза и даже деталей ВЧ-фильтра, примененного к наблюдаемым и модельным данным. Реконструированное в полосе до $f=0$ смещение включало статическую компоненту (ступеньку) с амплитудой –2 см для NS и + 3.5 см для EW.

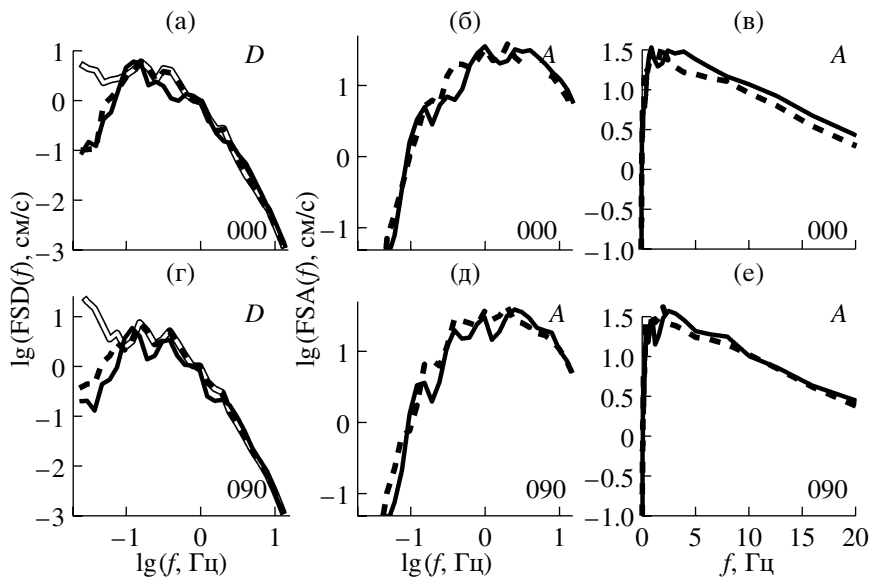


Рис. 5. Амплитудные спектры Фурье смещения (а), (г) и ускорения (б), (в), (д), (е) движения грунта для варианта модельных временных функций рис. 4. Двойная линия – модельный спектр, сплошная и штриховая линии – наблюдаемый и модельный спектры после фильтрации. Пара (в), (е) имеет натуральный масштаб по абсциссе, по остальным шкалам отложены логарифмы. Компоненты: (а), (б), (в) – NS; (г), (д), (е) – EW.

$$\lg f_c = -2.25 - 0.5 M_w = 7.6 - (1/3) \lg M_0, \quad (4)$$

что дает для $M_w = 7.65$ ($\lg M_0 = 27.525$) $f_c = 0.0266$ Гц. Вообще говоря, такая оценка f_c по M_w справедлива

только при типовом, среднем значении $\Delta\sigma$ (около 40 бар для семейства спектров [Gusev, 1983]). Но такой подход к выбору f_c в данном случае оправдан, так как значение площади очага $S = \pi LW/4 =$

= 3300 км² очень близко к ожидаемому по формуле $\lg S = 0.5 M_w - 4.1$ из [Гусев, Мельникова, 1990], которую можно принять за стандарт. Значения оставшихся двух параметров искали путем перебора, подобранные значения составляют $C_{ba} = 21$ и $\lg A_{HF} = 27.33$; при этом $f_b = 0.56$ Гц и $\epsilon = 0.0496$. По принятой корнер-частоте $f_a = f_c = 0.0266$ Гц, можно оценить типичную для $M_w = 7.65$ очаговую длительность, которая должна бы составить около $1/0.0266 = 38$ с. Это сопоставимо с фактической цифрой 45 с. Такое согласие – результат взаимной компенсации эффектов низкого *Mach*, с одной стороны, и суммарного эффекта изометричной формы и двустороннего распространения разрыва, с другой. В более обычном случае вытянутого одностороннего разрыва согласие исчезло бы.

Степень численного согласия наблюдаемых и расчетных максимальных амплитуд смещений, скоростей, и ускорений находится в пределах 10–15%. Оценивали также согласие наблюдаемых и модельных спектров реакции. Расхождения для средних по двум компонентам и по каждому из четырех выделенных диапазонов частот 0.07–0.3, 0.3–1, 1–3 и 3–12 Гц, малы, составляя не более 5%. Для индивидуальных частот имеются выбросы до +60%/–35%, что можно в условиях отсутствия систематических различий считать вполне допустимым.

Итак, удалось приемлемым образом подогнать форму и уровень фактического очагового спектра путем подбора двух параметров: A_{HF} и C_{ba} . Хотя значения *Mach* и M_w также подгонялись, они варьировались лишь в узких пределах; в сущности, эти значения были зафиксированы по независимым данным. Используемый подход к описанию данных выглядит успешным, поскольку в его рамках подбором всего двух параметров удалось одновременно согласовать с наблюдениями уровни амплитуд для ускорений, скоростей и смещений, а также уровни спектров Фурье и спектров реакции в широкой полосе частот.

Обсуждение. Сопоставим наш результат с другими данными. Во-первых, отметим, что значение $\lg A_{HF} = 27.33$ заметно превышает японское среднее для межплитного очага с $M_w = 7.65$, для которого, согласно сводке в [Irikura, 2006], следует ожидать $\lg A_{HF}$ [дин см/с³] = $(1/3)\lg M_0$ [дин см] + 17.39 = 26.56. Отклонение от этого тренда обозначим $\delta \lg A_{HF}$, в нашем случае $\delta \lg A_{HF} = +0.77$. Для внутриплитных толчков в Японии, по тому же источнику, $\delta \lg A_{HF}$ составляет около +0.5–0.6. Очаг 1971г. – однозначно внутриплитный, это хорошо видно на рис. 1б, где расположение верхней группы гипоцентров на глубинах 20–45 км как раз соответствует позиции границы плит на разрезе поперек структур дуги. Кроме того, очаг 1971 г. – промежуточной глубины; этот фактор часто ведет к заметному повы-

шению уровня высоких частот [см. напр. Гусев, Мельникова, 1990]. Данные факторы независимы и их вклады должны суммироваться. Таким образом, можно считать, что оцененное нами A_{HF} находится в приемлемом согласии с данными по Японии.

Параметр f_b управляет расположением правого горба в спектре. Для данных по Японии сам факт двугорбой формы спектров выявлялся неоднократно [Koyama et al., 1982; Izutani, 1984], но количественно это свойство не изучено. Двугорбый характер калифорнийских спектров изучен лучше. При той же M_w , в рамках модели “2Brune”, формула из [Atkinson, Silva, 1997] дает для условий Калифорнии $f_b = 0.29$ Гц, что указывает на определенное, но не особенно резкое различие. В целом, полученное описание спектра не противоречит результатам по хорошо изученным сейсмоактивным зонам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый вариант методики и программного обеспечения для сейсмологически обоснованного моделирования движений грунта успешно опробован на материале регистрации сильного землетрясения 24.11.1971 г. в районе Петропавловска-Камчатского. Это – самое сильное из записанных здесь землетрясений, поэтому его моделирование представляет, наряду с научным, также и большой практический интерес. Впервые для данных на Дальнем Востоке России удалось в широкой полосе частот успешно промоделировать реальную запись землетрясения и оценить параметры его очага. При этом по существу прошли комплексную проверку и наши представления о структуре среды под Камчаткой (скорости и поглощение), и общее описание пространственно-временной структуры очага, и примененный вариант параметризации двугорбых очаговых спектров. Подбором всего двух параметров удалось задать вероятный очаговый спектр, на основе которого были успешно описаны наблюдения в широкой полосе частот. В результате получены близкие к наблюдаемым модельные значения амплитуд и уровней спектров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №07-05-00775.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции “Петропавловск” // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46–58.
- Алексеев А.С., Михайленко Б.Г. Метод расчета теоретических сейсмограмм для сложнопостроенных моделей сред // Докл. АН СССР. 1978. Т. 240. № 5. С. 1062–1065.
- Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С. Петропавловское землетрясение 24 (25).XI. Землетрясения в СССР в 1971 году. М.: Наука. 1975. С. 163–171.

- Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясения и ее применение к оценке короткопериодного сильного движения // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С.3–22.
- Гусев А.А. Модель очага землетрясения со множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 41–55.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 29–40.
- Гусев А.А., Петухин А.Г., Гусева Е.М. и др. Средние спектры Фурье сильных движений грунта при землетрясениях Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 60–70.
- Зобин В.М. Процесс в очаге Петропавловского землетрясения (24 ноября 1971г.) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 91–103.
- Зобин В.М., Федотов С.А., Гордеев Е.И. и др. Сильные землетрясения на Камчатке и Командорских островах в 1961–1986г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 3–23.
- Павлов В.М. Расчет статических смещений от силы в слоистом полупространстве // Вулканология и сейсмология. 2006. № 4. С. 25–33.
- Штейнберг В.В., Фремд В.М., Феофилактов В.Д. Колебания грунта при сильных землетрясениях на Камчатке в 1971 г. // Сильные Камчатские землетрясения 1971 года. Владивосток. 1975. С. 7–14.
- Aki K. Scaling law of seismic spectrum // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 1217–1231.
- Atkinson G.M. Earthquake source spectra in Eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Am. 1993. V. 83. P. 1778–1798.
- Atkinson G.M., Silva W. An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Am. 1997. V. 87. P. 97–113.
- Blandford A.A. A source model for complex earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Am. 1975. V. 65. P. 1385–1405.
- Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.
- Fukao Y., Kikuchi M. Source retrieval for mantle earthquakes by iterative deconvolution of long-period P-waves // Tectonophysics. 1987. V. 144. P. 249–269.
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 17883–17898.
- Gusev A.A. Descriptive statistical model of earthquake source radiation and its application to an estimation of short-period strong motion // Geophys. J. Roy. Astr. Soc. 1983. V. 74. P. 787–808.
- Gusev A.A. Multiasperity fault model and the nature of short-period sub-sources // Pure Appl. Geophys. 1989. V. 130. P. 635–660.
- Gusev A.A., Pavlov V.M. Wideband simulation of earthquake ground motion by a spectrum-matching, multiple-pulse technique. 1st Europ. Conf. Earthq. Eng. Seismol. Proceedings CD, Paper 408. Geneva. 2006. P. 1–10.
- Haskell N.A. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults // Bull. Seismol. Soc. Am. 1964. V. 54. P. 1811–1841.
- Haskell N.A. Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults. II. A stochastic fault model // Bull. Seism. Soc. Am. 1966. V. 56. P. 125–140.
- Irikura K. Lecture note on strong motion seismology, Chapter 5. “8th Workshop 3D Modelling of seismic waves generation, propagation and their Inversion”. ICTP. Trieste. 2006.
- Izutani Y. Source parameters relevant to heterogeneity of a fault plane // J. Phys. Earth. 1984. V. 32. P. 511–529.
- Koyama J. Earthquake source time-function from coherent and incoherent rupture // Tectonophysics. 1985. V. 118. P. 227–242.
- Koyama J., Takemura M., Suzuki Z. A scaling model for quantification of earthquakes in and near Japan // Tectonophysics. 1982. V. 84. P. 3–16.
- Papageorgiou A.S., Aki K. A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of the strong ground motion. I. Description of the model // Bull. Seismol. Soc. Am. 1983. V. 73. P. 693–722.
- Papageorgiou A.S., Aki K. Scaling law of far-field spectra based on observed parameters of the specific barrier model // Pure Appl. Geophys. 1985. V. 123. P. 354–374.
- Pavlov V.M. A convenient technique for calculating synthetic seismograms in a layered half-space. Proceedings Intern. Conf. “Problems of Geocosmos”. St. Petersburg. 2002. P. 320–323.
- Schmitt F., Marsan D. Stochastic equations for continuous multiplicative cascades in turbulence // Eur. Phys. J. 2001. V. 20. P. 3–6.