### УДК 550.34 СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННОГО ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ. 3. СПОСОБ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОПРОБОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ

## А.А. Гусев<sup>1,2</sup>, В.М.Павлов<sup>2</sup>, Е.М. Гусева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии РАН, <sup>2</sup> Камчатский филиал Геофизической службы РАН, *г. Петропавловск-Камчатский, Россия* 

Аннотация. Ранее была разработана процедура стохастического моделирования очага землетрясения для применения в расчете ожидаемых сильных движений грунта. В процедуре использовано кинематическое описание очага в широкой полосе частот; очаг описывается как сетка точечных субисточников с подходящими временными функциями. В работе описаны три примера применения данной процедуры для моделирования сильных движений грунта. Для расчета движений от каждого элементарного субисточника модельного очага использовали функции Грина для слоистой упругой среды. В двух случаях проводится имитация записей реальных землетрясений. В обоих случаях получено приемлемое согласие модельных и реальных параметров движения грунта. В одном из этих случаев по оригинальной методике дополнительно выполнен анализ неопределенности результатов, оценена роль неточного знания ряда определяющих параметров, а также роль чисто случайных факторов. Еще в одном случае проведен расчет сценарного землетрясения вблизи разлома-очага без прямого контроля по наблюдениям.

**Ключевые слова:** моделирование, расчетная схема, очаговые спектры, бегущая полоска, распространение разрыва, субисточники, сценарные землетрясения, примеры применения методики.

PACS 91.30.Ab, 91.30.Bi, 91.30.pd, 91.30.Mv

#### ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа продолжает исследование, начатое в [Гусев, 20ХХаб] (далее Г1, Г2), где описана методика моделирования очага землетрясения как излучателя сейсмических волн с целью создания основ реалистического синтеза сильных движений грунта. Обсуждаются примеры применения данной методики. В Г1 предложено синтезировать широкополосное кинематическое описание очага на основе объединения наиболее существенных черт наблюденных очагов землетрясений и сейсмических волн, которые они излучают. На низких частотах (НЧ) очаг описывается как бегущая полоска - импульс подвижки, этот импульс заметает площадку очага. Полная величина подвижки в точке очага считается случайной функцией с реалистически заданной статистикой и корреляционными свойствами. Скорость распространения полоски и фронта разрыва - переменная, но с определенным средним. НЧ излучение от полоски определяется кинематической моделью разрыва в духе модели Хаскелла. На высоких частотах (ВЧ) излучение от той же самой бегущей полоски предполагается некогерентным и задается на полуэмпирической основе. Для расчетов модель дискретизируется в пространстве на основе сетки точечных субисточников с некоторыми временными функциями. За счет применения особой процедуры модельный очаг создает излучение с правдоподобным широкополосным спектром в дальней зоне. Создаваемый при моделировании экземпляр модели очага зависит от нескольких случайных датчиков, а также от значений ряда параметров. Значения этих параметров можно задать так, чтобы обеспечить реалистические свойства очага. Параметры также можно возмущать, для того, чтобы изучить неопределенность свойств сильных движений, связанную с очагом. Таким образом, можно не только моделировать индивидуальные сценарные очаги, но и характеризовать надежность расчетов.

В настоящей статье, имеющей характер сводки выполненных работ, обсуждаются три случая практического применения разработанной в Г1, Г2 процедуры. В детально изученном [Gusev, Pavlov, 2006] случае землетрясения Нортридж 1994 сильные движения вблизи очага, которые сравниваются с синтезируются наблюдениями; обнаруживается приемлемое согласие. Также проводится детальный анализ неопределенности результатов расчетов. Синтез сильного движения для станции «Петропавловск» от события 24.11.1971 и его сопоставление с наблюдениями [Гусев и др., 2009] представляет большой практический интерес, так как проведен на российском материале сильных движений для очага заметной магнитуды ( $M_{w}$ =7.6). В этих двух случаях процедура из Г1, Г2 применялась для имитации наблюденных движений грунта, что позволило опробовать методику в условиях контроля и убедиться в ее работоспособности и корректности. Еще одна работа проводилась без контроля на материале наблюдений. Это - расчет сильных движений от гипотетического повторения Мессинского землетрясения 1908 г. [Gusev et al., 2008]. Это - интересный случай, когда был принципиально необходим именно широкополосный синтез, так как данное прикладное исследование вели применительно к сооружениям большого размера, с длинным собственным периодом. Обычные оценки, например, в виде пиковых ускорений, в таких случаях бесполезны. Кроме того, необычно малым было расстояние (2-3 км) от поверхности разлома-очага до площадки предполагаемого строительства. Подход Г1, Г2 позволяет решать подобные задачи.

В работе существенно используются ранее введенные в Г1, Г2 параметры очагов и их обозначения. Настоящая статья - третья из цикла, посвященного моделированию

очага. Она написана на основе ранее опубликованного материала [Gusev, 2011], который был подвергнут существенной доработке и модернизации.

# 1. О ЗАДАЧЕ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

До рассмотрения примеров полезно обсудить саму проблему описания вариативности или неопределенности, связанной с расчетами сильных движений при возможных землетрясениях. Оценка неопределенности параметров предсказываемых "типичных" или "ожидаемых" движений грунта – это очень важный компонент детерминистического анализа сейсмической опасности. Эта неопределенность имеет ряд компонентов, которые во многом не имеют отношения к настоящему исследованию, например, те, что связаны с идентификацией геологических разломов носителей потенциальных очагов, с выбором положения возможных очагов на этих разломах и с приписыванием этим протяженным очагам адекватных значений магнитуды *M<sub>w</sub>*, единичного тензора момента и положения в пространстве площадки очага и гипоцентра (точки старта разыва). Также имеется неопределенность, связанная с недостаточно известными свойствами трасс распространения волн и геологии площадки строительства (или, в случае опробования методики на реальных данных, геологии точки регистрации). Эти факторы здесь почти не обсуждаются. Единственное, что обсуждается - это неопределенность, непосредственно связанная с описанием конкретного очага землетрясения. Абстрактно говоря, эти неопределенности можно пытаться разделить на две компоненты: естественную вариабельность землетрясений (в американской терминологии так называемая "алеаторная компонента") и на эффекты нашего незнания (в американской терминологии - "эпистемологическая компонента"). Однако на практике эти факторы перемешиваются. Чтобы проанализировать неопределенность в рамках обсуждаемой техники моделирования, были испробованы ряд подходов.

На практике полезно выделить разные группы факторов. Имеется, во-первых, случайная вариабельность, связанная с внутренней стохастической частью модели. Ее можно анализировать в целом или по отдельности, пофакторно, путем использования серии начальных значений наборов датчиков случайных чисел, которые определяют финальные значения функции подвижки, распространение фронта разрыва и локальные временные функции для скорости подвижки. Другой род вариабельности (который здесь также рассматривается как случайный) - это тот, который связан с неопределенностью исходных параметров, либо естественной, либо связанной с нашим неполным знанием. В этом случае использовали один их двух подходов. Первый подход заключается в том, чтобы рандомизировать эти параметры, и анализировать, связанные с ними вариации таким же образом, как это делалось для "внутренне стохастических" параметров, описанных выше. Такой подход применялся для анализа эффекта вариаций следующих факторов: (1) положение точки старта разрыва на площадке будущего очага; (2) значение средней по очагу скорости фронта разрыва и (3) сброшенное напряжение (среднее по очагу). Другой подход - анализировать влияние систематических вариаций значений параметров на параметры сильного движения. Когда подобная связь не слишком нелинейна, ее можно линеаризовать и ввести параметры чувствительности. Когда последние известны, вклад неопределенности в значениях конкретного входного параметра в суммарную неопределенность оценить нетрудно. Затем вклады от разных параметров можно объединить. При этом одинаково просто изучать и случаи, когда неопределенность связана с природными вариациями, и случаи, когда эта неопределенность отражает наше незнание. Однако этот подход может быть использован только с большой осторожностью, потому что в этом случае игнорируется как взаимодействие между параметрами, так и нелинейность используемых соотношений. В результате оценки, полученные на этом пути, могут быть искажены. В принципе данную работу можно было бы проводить на основе теории эксперимента. Это могло бы существенно снизить объем расчетов и к тому же изучить взаимодействие между факторами; но подобные более тонкие подходы не опробовались.

Анализ вариабельности может в существенной мере помочь при попытке понять относительные вклады разных факторов в суммарную неопределенность. Подобные знания являются критически важными для того, чтобы судить о надежности предсказываемых сильных движений. Также, лишь этот род анализа позволяет генерировать осмысленные наборы "представительных вариантов" возможных сильных движений. В самом деле, если не удалось идентифицировать основные факторы неуверенности в оценках и их относительные веса, трудно сформировать ясную идею о том, какие вариации исходных параметров по отношению к их исходным базовым значениям могут привести к наиболее существенным гипотетическим "аномалиям" свойств будущего события. С точки зрения сейсмолога лишь такой род анализа может дать здоровую основу для конструирования адекватных наборов акселерограмм для инженерного анализа. Отметим, что почти каждое новое сильное землетрясение доставляет примеры «неожиданностей», «аномалий» и «рекордно больших амплитуд», так что данный вопрос имеет важнейшее практическое значение. Ясно, что прогноз «атипичных» движений грунта может быть не менее важен, чем прогноз «типичных».

# 2. АЛГОРИТМЫ И ПАКЕТ ACCSYN ДЛЯ РАСЧЕТОВ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА

Когда модель протяженного очага (в виде набора функций временного хода субисточников) уже сконструирована путем применения описанной в Г1, Г2 процедуры, при практической работе необходимо перейти к расчету собственно сильных движений. Ограничимся случаем приемников или площадок, гле нелинейность поведения грунтовой толщи может быть проигнорирована. Практически, это скальные площадки и, с ограниченной степенью приемлемости, площадки с плотным грунтом. Следует, однако, отметить, что по мере роста амплитуды волны, поначалу проявление нелинейности грунта имеет характер дополнительного затухания, в особенности в высокочастотной части спектра. Если предположение о подобной слабой нелинейности приемлемо, описанный далее подход может давать оценки сверху, что в некоторых задачах может быть удовлетворительным. (Чуть более аккуратное описание возможно в пределах ограниченного диапазона амплитуд путем введения амплитудно-зависимого параметра к «каппа»). В рамках линейного подхода расчет сильных движений может основываться, как обычно, на комбинировании временных функций субисточников с подходящими функциями Грина для упругой земной среды. Следует отметить, что в существующей версии процедуры моделирования такие параметры очага, как угол простирания, угол падения и угол скольжения, приняты одинаковыми для всех субисточников, а очаг состоит из единственного плоского прямоугольного разрыва. (Возможно, однако, задать в пределах прямоугольника функцию окна с произвольной структурой нулевых областей).

Чтобы уровень описания поведения среды соответствовал детальности системы моделирования очага, необходима методика расчета широкополосных функций Грина. В нашей практике использовалась оригинальная программа, разработанная В.М.Павловым. Она основана на методе дискретных волновых чисел, и использует метод матричного импеданса [Pavlov, 2002; Павлов, 2006, 2009; Gusev, Pavlov, 2009] для вычисления импульсной реакции слоистой упругой среды. Для этого, часто реалистического, случая программа поставляет аккуратное широкополосное описание движений грунта и не имеет внутренних ограничений по отношению к толщинам слоев и ширине полосы частот. В частности, она одинаково хорошо описывает и так называемый "fling", то есть низкочастотное движение с остаточной подвижкой, и однополярный импульс скорости вблизи разлома, и, равным образом, высокочастотные импульсы объемных волн.

Расчет модельного сильного движения требует выполнения суммирования вкладов субисточников, то есть в сущности свертки по пространству-времени. Его первый шаг заключается в том, что свертываются временные функции субисточников и соответствующие функции Грина для заданного приемника: свертка идет по времени. На втором шаге результаты этой операции суммируются (со сдвигами по времени) для всех субисточников; в результате получается движение грунта под площадкой. Дополнительно на втором шаге могут применяться поправки за поглощение (через множитель,  $\exp(-\pi\kappa f)$ , учитывающий параметр грунтовой толщи площадки  $\kappa$ ; а также через множитель, учитывающий эффект потерь на трассе луча). В качестве альтернативного подхода можно использовать частотно-независимый вертикальный профиль параметра Q, который включен в основную процедуру расчета функций Грина.

В простейшем случае однородной среды главное качественное отличие модельных движений грунта от очаговых функций, детально проиллюстрированных в Г2 - это возникновение эффекта направленности или Допплер-эффекта. На рис. 1 проиллюстрирован вариант возможной зависимости модельного сигнала смещения в приемнике в дальней зоне от угла η между направлением распространения фронта разрыва и лучом к приемнику.

Последовательность из программы PULSYN, программы расчета функций Грина и модуля свертки и суммирования организована как программный пакет под названием ACCSYN.

В дальнейшем даются примеры применения пакета ACCSYN в сжатом виде для того, чтобы проиллюстрировать описанный подход; читатель может обратиться к исходным публикациям за большим числом деталей. Из трех представленных далее случаев в первых двух главной целью было проверить и подтвердить корректность подхода в целом, так что главной задачей было реалистическое моделирование наблюденных сильных движений грунта. В третьем же случае была сделана попытка имитировать неизвестные сильные движения. Во всех случаях использовался пакет ACCSYN.

Необходимо упомянуть, что успех имитации реальных данных с помощью результатов моделирования понимается здесь в инженерно-сейсмологическом смысле. Как для высокочастотных, так и для низкочастотных сигналов (то есть, в сущности, для ускорений и смещений грунта) суждение о качестве имитации делается неформально и основано на подобии общего внешнего вида и приемлемом согласии пиковых амплитуд, длительностей, спектров реакции и сглаженных амплитудных спектров Фурье.

# 3. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ НОРТРИДЖ 1994: МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЙ ГРУНТА ВБЛИЗИ ОЧАГА.

Общие вопросы. Алгоритмы, описанные в Г1, Г2, были применены для имитации серии 19 акселерограмм, записанных в эпицентральной зоне вблизи очага землетрясения Нортридж, Калифорния, 1994 г., M=6.7. Детальное описание этой работы см. [Gusev, Pavlov, 2009]; наиболее полное описание анализа неопределенности - в препринте [Gusev, Pavlov, 2006]. Параметры моделей очага и среды были выбраны на основе опубликованных данных; единственный параметр, значение которого было подогнано к данным – это параметр  $\kappa$ ; характеризующий поглощение в грунтовой толще под станцией. Записи были получены на грунтах различных типов. В соответствии с геологической колонкой станции были разделены на три группы: "скальные", "осадочный бассейн" и "промежуточные". Внутри каждой из трех групп использовался один и тот же вертикальный разрез. Общее расположение станций и модельного очага см. рис. 2; площадка модельного очага примерно совпадает с площадкой фактического очага. Далее приводится комментированный список принятых при моделировании значений основных параметров:

*Центр очага:* φ=34.28°; λ=-118.56°; *H*<sub>c</sub>=12.5 км; азимут простирания=122°; угол падения= 40°; угол скольжения=101°;

Точка начала вспарывания:  $\phi$ =34.35°  $\lambda$ =-118.54° глубина=17 км (из результатов инверсии);  $M_w$ =6.7; L=18 км; W=24 км;(горизонтальный размер меньше, чем размер по падению);

 $v_{rup0}$ =3 км/с (Mach=0.85),  $T_{rise}$ =0.7s ( $C_H$ =0.1); сетка источников 7×7; DV=0.8;  $\gamma$ = 1.5.

 $\sigma_{\ln t} = 0.5$ ,  $\sigma_{\ln xy} = 0.5$  (это пробные значения для данных параметров, промежуточные между случаем слабых вариаций, когда  $\sigma_{\ln} \approx CV < 0.3$ , и сильно выраженными вариациями при  $\sigma_{\ln} > 1$ ; в настоящее время оба эти значения следует считать несколько заниженными).

Закон масштабирования очаговых спектров: для конкретного случая Запада США, принят закон  $\omega^2$  по Бруну, в конкретной версии [Joyner, 1984], причем использовано приведенное там опорное значение  $\Delta \sigma = 50$  бар; так определяется региональное среднее для очагового спектра.

Сброшенное напряжение  $\Delta \sigma$ : принято равным 75 бар (в соответствии с опубликованным значением) то есть в 1.5 раза выше, чем принятое региональное среднее; тем самым, значение параметра  $\delta$  равно 0.18.

Варианты модельных результатов, показанные ниже, выбраны из десяти прогонов процедуры моделирования, причем менялись все три начальных значения датчиков случайных чисел (НЗДСЧ); в этих и других примерах параметры движения грунта, достаточно близки к наблюденным. Диапазоны вариаций этих параметров проанализированы отдельно ниже. На рис. 2 даны примеры временных функций субисточников. На рис. 3 даны примеры очаговых временных функций смещения, скорости и ускорения для двух прогонов моделирующей системы - вариантов 206 (основного) и 300. На рис. 4 можно сравнить модельные (вариант 206) и наблюденные временные функции движений грунта для пяти представительных станций. Различие между смоделированными и наблюденными временными функциями анализировалось в форме невязки логарифма амплитуды, что в общем случае обозначается как  $\Delta lgA = lgA$ (модельный)- lgA(наблюденный). Все приводимые  $\Delta lgA$  - средние по двум горизонтальным каналам. Невязки определяли для пиковых амплитуд ускорений, скорости и смещения, а также для спектра реакции псевдоускорения *PRA* ( $\Delta lgPRA$ ),

который вычисляли для 25 частот, покрывающих диапазон 0.1-20 Гц относительно равномерно по логарифмической оси. Значения  $\Delta lgA$  осредняли по 19 станциям; также находили стандартные уклонения (рис. 5). Конкретные заметные отклонения модельных значений *PRA* относительно наблюденных (например, вблизи 2 Гц для варианта 300, см. рис. 5) - это случайные особенности поведения индивидуального модельного очага, а не общая тенденция. Это хорошо видно при сравнении с графиком для варианта 300, где упомянутый заметный выброс отсутствует. Подобные расхождения демонстрируют естественную изменчивость спектров для различных вариантов очага, которые моделируются при одном и том же наборе параметров очага, но при различных НЗДСЧ. В целом, результаты моделирования показывают вполне приемлемое общее согласие с материалами наблюдений. Детальный численный анализ вариантов моделирования приведен в следующем разделе.

# 4. ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ НОРТРИДЖ 1994: АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Изучалась неопределенность параметров сильных движений, смоделированных для землетрясения Нортридж 1994 г. на основе общего подхода, обсужденного выше. Компонента неопределенности, связанная со свойствами очага, определялась вместе с другими компонентами путем внесения возмущений, случайных или систематических, в ряд факторов, связанных с очагом. Анализировались средние значения  $\Delta lg(A)$  по 19 станциям. Вариации этих средних от одного прогона моделирования к другому позволяют изучить неопределенность, связанную с конкретным возмущаемым фактором. В качестве побочного продукта подобного анализа также определяется разброс между станциями. Он дает информацию для оценки компоненты неопределенности, связанной с расположением станций; точнее, с отклонением свойств индивидуального пути распространения сейсмических волн в реальной среде от такого же пути в модельной слоистой среде. Эта информация позволит затем сопоставить вклады в неопределенность за счет факторов среды и очага: неопределенности, связанные с очагом и связанные с местом площадки или приемника. Три чисто стохастические компоненты вариабельности изучались по единой схеме следующим путем. В первой серии вариантов использовались десять конкретных НЗДСЧ, что давало десять конкретных вариантов функции финальной подвижки; в то же время НЗДСЧ, которые задавали историю разрыва и временные функции субисточников, были зафиксированы. Во второй серии подобным же образом, использовались десять НЗДСЧ, которые определяли десять вариантов случайной истории распространения разрыва, в то время как распределение подвижки и временной ход субисточников были заморожены. Наконец, в третьем тесте отдельно изучалась компонента, связанная только с временным ходом субисточников. Подобным же образом был оценен эффект неизвестного значения средней по очагу скорости фронта: значение параметра Mach, брали из однородного распределения в диапазоне 0.6-0.9. Аналогично варьировали заранее неизвестное положение точки старта разрыва, которое принимали в произвольном месте, в пределах нижней трети поверхности очага. При анализе влияния факторов предыдущие три НЗДСЧ были зафиксированы. Для других этих анализируемых факторов был использован подход с параметром чувствительности. Чувствительность S определяют как производную S=dY/dX, где X - это входной параметр, а *Y* - это параметр движения грунта. Сначала определяли значение *S* для пары параметров (x, y) с помощью численных тестов, а затем комбинировали это значение с априорным значением  $\sigma_X$  среднеквадратического разброса параметра X; в результате получалась оценка  $\sigma_Y = S\sigma_X$  для среднеквадратического разброса параметра Y (обычно  $Y=\Delta lg(A)$ ). Найденные оценки значений чувствительности S были относительно надежными; в то же время предположения относительно разброса входных параметров были в сущности догадками. Эти предположения (см. табл. 1) были скорее "минимальными", чем "консервативными". Таким образом, весь анализ следует рассматривать как упражнение, хотя и реалистическое. Анализ неопределенности проводился по отношению к пиковым амплитудам и к спектрам реакции на 18 периодах, и все это делалось для средних по двум горизонтальным компонентам. Часть результатов приведена в табл. 1. Она включает восемь факторов собственно параметров очага, а также глубину центра прямоугольника-очага, угол скольжения и значение  $M_0$ . Также приведены значения компонента разброса амплитуд, связанного с положением станции (приемника). Последнее значение получено чисто эмпирически. На начальном этапе анализировались еще два параметра:  $\gamma \, u \, D_{\nu}$ , но их эффект оказался небольшим и соответствующие значения чувствительности определялись неуверенно.

Анализ таблицы 1 и других данных показал следующее. Вклады каждого из трех чисто случайных факторов - одного порядка по величине. Наиболее заметный вклад от случайной вариабельности распределения величины подвижки. Самый низкий вклад - от случайных временных функций источников. Хотя этот результат может выглядеть неожиданным, но он согласуется с тем известным фактом, что экстремальные значения случайной функции относительно устойчивы. Эффект случайной вариабельности деталей историй распространения разрыва среди трех обсуждаемых эффектов является промежуточным по величине. Среди других факторов, которые анализировались как случайные, имеется наиболее выраженный индивидуальный фактор; это - среднее по всей площадке очага значение скорости вспарывания или число Маха. Этот параметр, по-видимому, проявляет себя главным образом через длительность сигнала. Вклад вариаций положения точки старта разрыва оказался невелик. Этот вывод, однако, нельзя обобщать: в общем случае эффект этого фактора может быть намного больше. Дело в том, что в случае очага Нортридж 1994 все приемники находятся на свободной поверхности, а точка начала вспарывания находится в нижней части очага. В этом специальном случае эффекты направленности в большой мере однотипны или сравнимы для большинства станций. Поскольку именно фактор положения точки старта определяет, в основном, эффекты направленности, полученная нами оценка его роли находится на нижнем конце ее реального диапазона.

Далее идут параметры, которые анализировались с помощью чувствительности. Результаты в отношении этих параметров являются менее убедительными, потому что они основаны на пробных значениях среднеквадратических вариаций входных параметров. Эффект логарифма сброшенного напряжения  $\lg \Delta \sigma$  (т.е.  $\delta$ ) относительно умеренный. Надо отметить, что он анализировался при фиксированном значении  $M_0$ . Вклад этого фактора он связан с комбинированным эффектом двух промежуточных факторов: с фактором, высокочастотного уровня спектра и, что менее очевидно, с фактором изменения размера очага и тем самым, изменения длительности сигнала. Эффект параметра  $\sigma_{\ln,t}$  является умеренным, но он достаточно заметен. Этого можно было ожидать, поскольку данный фактор прямо модифицирует пиковые значения сигнала. Влияние фактора  $\sigma_{\ln,xy}$  (также как и показателя  $\gamma$  в волночисловом спектре подвижки) оказалось невелико; этот вывод - неожиданный и заслуживает более глубокого изучения. Эффект параметров «глубина очага» *H*<sub>c</sub> и угла падения приводится только для иллюстрации; они зависят от фактической геометрии расположения очага относительно станций и никак не могут годиться для обобщенных суждений. Объединенный эффект стохастических И параметрических параметров

неопределенности порождает неопределенность порядка 0.11 единиц логарифма для амплитуд lg(A). Также для иллюстрации приводятся эмпирические оценки стандартных уклонений невязок между станциями. Разброс между станциями характеризует неконтролируемую неопределенность оценок, связанную с отклонением фактической геологии и трасс распространения от значений, которые были использованы при расчете модельных функций Грина. Можно видеть, что, несмотря на разделение станций на три группы, существенная часть эффектов распространения и геологии площадок осталась необъясненной. Среднеквадратическое значение неуверенности за счет фактора станции составляет 0.14, в то время как за счет очага - 0.11; когда они комбинируются, то получается полная неопределенность 0.18.

Каждый суммарный эффект, связанный с очагом, показан в табл. 1 (или на рис. 5) для средних по двум компонентам; чтобы перейти к величине, характеризующей максимальную (из двух) горизонтальную амплитуду, значение стандартного уклонения надо умножить на коэффициент порядка 1.1-1.4. Таким образом, фактор очага может характеризоваться цифрой 0.14-0.17 ед. десятичного логарифма (или 0.32-0.39 натурального). Это значение следует рассматривать как разумную минимальную характеристику; численно оно выглядит удовлетворительно и наводит на мысль, что нашу процедуру моделирования можно считать непротиворечивой. Помимо пиковых амплитуд и спектров реакции, также и длительности, и общий вид промоделированных записей разумно согласуются с наблюденными записями. В работе [Bazzurro et al., 2004] были проанализированы результаты, полученные в описанной процедуре моделирования, вместе с результатами шести других методик для моделирования грунта. Изучалось, насколько хорошо эти семь методик в состоянии имитировать пики линейной и особенно нелинейной реакции системы с одной степенью свободы; базой для сравнения было согласие с оценками, полученными по наблюденным движениям грунта. Среди семи наборов смоделированных данных, методика, описанная в Г1, Г2, была единственной, которая дала приемлемые результаты по всей широкой полосе частот (0.25-10 Гц), в пределах которой проводили сравнение.

### 5. ПЕТРОПАВЛОВСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 24 НОЯБРЯ 1971 ГОДА НА КАМЧАТКЕ

Сильное землетрясение 24 ноября 1971 года с гипоцентром вблизи Петропавловска-Камчатского (с моментной магнитудой М<sub>w</sub>=7.6, глубиной центра очага  $H_c=105$  км, и эпицентральной интенсивностью  $I_0=7-8$  MSK, рис. 6a), было записано на компонентах велосиграфа сильных движений ИСО-С5С горизонтальных на сейсмической станции "Петропавловск" (код РЕТ). Это - запись сильных движений с наибольшей амплитудой среди полученных до сих пор в Петропавловске-Камчатском, и ее имитация дает возможность проверить описанную методику для случая субдукционного землетрясения [Гусев и др., 2009]. На основе обобщения результатов более ранних исследований очага данного землетрясения можно было определить геометрические параметры длительность разрыва. Очаговая И плоскость близвертикальна, процесс разрыва приблизительно двусторонний. Основные параметры очага приведены в списке ниже, а сетка субисточников изображена на рис. 66. Комбинация большой длительности разрыва и двустороннего характера вспарывания указывает на то, что средняя скорость распространения разрыва была низкой. Из всех общих параметров разрыва два – угол скольжения и M<sub>w</sub> были подогнаны при моделировании; кроме того, были подогнаны два спектральных параметра. Подгонка проводилась с помощью подбора. В дополнение к этому,

потребовалась предварительная методическая работа, чтобы установить подходящую аналитическую форму для описания поведения спектра. В результате путем подбора четырех параметров очага удалось успешно промоделировать следующие черты сильного движения: пиковое ускорение, пиковая скорость, пиковое смещение, длительность сильных колебаний грунта, (рис. 7), уровень спектра Фурье (рис. 8), а также спектр реакции. Особенность события 1971.11.24 – это относительно высокий уровень очагового спектра ускорений, что, скорее всего, связано с внутриплитовым положением разрыва.

Вот список принятых основных значений параметров:

*Центр очага:*  $\phi$ =52.79°;  $\lambda$ =159.59°;  $H_c$ =105 км; *точка начала вспарывания:*  $\phi$ =52.71°;  $\lambda$ =159.47°; глубина 105 км.

Угол простирания=43°; угол падения= 83°; угол скольжения=85-110° (диапазон опубликованных значений по трем источникам);

 $M_w$ =7.1-7.7 (диапазон опубликованных значений по четырем источникам), принятое значение 7.65, полученное подгонкой; длина *L*=70 км; ширина *W*=60 км;

Скорость вспарывания  $v_{rup0}=1.1$  км/с (выбрана, чтобы удовлетворить известной длительности пакета объемных волн), (параметр Mach=0.28),  $T_{rise}=5$  с ( $C_H=0.1$ ); DV=1.5;  $\gamma=1.0$ ;  $\sigma_{\ln t}=0.75$ ;  $\sigma_{\ln xy}=1$ ;  $\kappa=0.055$  с.

Использована сетка субисточников 11×9. Чтобы подогнать фактический спектр записи, использовалась формула очагового спектра из [Atkinson, 1993] типа "2-Brune"

$$\dot{M}_{0}(f) = M_{0} \left( \frac{1 - \varepsilon}{1 + (f / f_{a})^{2}} + \frac{\varepsilon}{1 + (f / f_{b})^{2}} \right).$$
(17)

Здесь имеются две корнер-частоты: нижняя  $f_a$  и верхняя  $f_b$ , а также параметр  $\varepsilon$ , который вместе с ними и с  $M_0$  определяет детали формы спектра. Введем два уровня ВЧ спектра ускорения: истинный уровень спектра ускорения  $A_0$ , и аналогичный потенциально возможный наиболее низкий уровень  $A_{01}$ , который реализуется для опорного случая, когда  $f_b = f_a$ , или когда  $\varepsilon = 0$  (тогда  $A_0 \equiv A_{01}$ ). Легко видеть, что  $A_{01} = M_0 (2\pi f_a)^2$ , и что  $\varepsilon = (A_0/A_{01} - 1)/((f_b / f_a)^2 - 1)$ . Эта формула позволяет прямо использовать при подгонке параметр  $A_0$  вместо менее прозрачного по смыслу параметра  $\varepsilon$ . Использованная оценка для  $f_a$  основывается на тренде корнер-частоты  $f_c(M_0)$  для полуэмпирического закона масштабирования из [Gusev, 1983]. Этот тренд можно записать в виде:

$$\lg f_c = 7.6 - \lg M_0 / 3 + \delta / 3 = 2.25 - 0.5 M_w + \delta / 3$$
(18)

здесь член  $\delta$ З представляет возможную коррекцию за нестандартное значение сброшенного напряжения. Было использовано стандартное опорное значение  $\delta = 0$ , это дает  $f_a = f_c = 0.0266$  Гц. Начальная оценка для  $A_0$  была принята согласно эмпирическому тренду из [Dan et al., 2001], проверенному в [Irikura, 2006]. Этот тренд опирается на данные Японии и согласуется с данными запада США. Если добавить поправочный член  $\delta A_0$  для учета нестандартного значения  $A_0$ , то их результат можно записать так:

$$\lg A_0 = 17.391 + \lg M_0/3 + \delta A_0 = 22.741 + 0.5 M_w + \delta A_0 \qquad (19)$$

Значения двух подгоняемых параметров  $\delta A_0 = 0.76$  и  $f_b = 0.56$  Гц были определены путем проб и ошибок. Знак и величина отклонения  $A_0$  от среднего японского спектра

находится в хорошем согласии с расположением разрыва: на промежуточной глубине, в мантии, внутри океанической плиты. Результаты подгонки вполне удовлетворительны, см. рис. 7 и 8.

#### 6. ВОЗМОЖНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ В МЕССИНСКОМ ПРОЛИВЕ

В связи с пока замороженными планами строительства моста, соединяющего Сицилию с материковой Италией через Мессинский пролив, было интересно определить возможные длиннопериодные (T>1-2 с) компоненты опасных движений грунта в области опор моста. Такая попытка описана в работе [Gusev et al., 2008]. В качестве сценарного землетрясения было принято повторение разрушительного Мессинского землетрясения 1908 года (M=7), очаг которого располагался на взбросовом разломе, находящемся как раз под проливом (рис. 9а). Поскольку кратчайшее расстояние от разлома до площадки всего 3-4 км, кинематический процесс очагового разрыва следовало описывать достаточно детально. Чтобы представлять движение на очаге размерами 40×20 км, была использована плотная сетка субисточников из 33×15 элементов (рис. 9б). Горизонтальный верхний край прямоугольника очага находится на глубине 3 км, и верхний северный угол прямоугольника находится прямо под опорами моста. Таким образом, было выполнено условие, что кратчайшее расстояние от очага до площадки (3-3.5 км), заметно больше, чем размер субисточника (1.33×1.25 км). Далее следует комментированный список принятых значений основных параметров.

*Центр очага:*  $\phi$ =38.09°;  $\lambda$ =15.61°;  $H_c$ =7.85 км; (глубина верхнего края=3 км); угол простирания=20°; угол падения = 29°; угол скольжения=270°;

Точка старта разрыва:  $\phi$ =37.94°  $\lambda$ =15.53°, глубина=7.85 км;  $M_w$ =7.0; L=40 км;

W =20 км; *Скорость v<sub>rup0</sub>*=2.55 км/с (Mach=0.75), *T<sub>rise</sub>*=2 с (*C<sub>H</sub>*=0.1); сетка субисточников 33×15; *DV*=1.2; γ= 1.8; σ<sub>in t</sub> = 0.5; σ<sub>in xy</sub>=1.0.

Принятый закон масштабирования очаговых спектров: принимался согласно [Gusev, 1983]. Принято значение  $\delta = -0.05$ ; это значение определяется жестко из условия, чтобы набор параметров { $M_0$ , L, W,  $\Delta \sigma$ } был взаимно согласован, в предположении  $C_{MS}$ =4.1;  $\delta_{HF}$  = 0.

Для расположения точки старта разрыва было принято наименее благоприятное для положения опор моста место, а именно, на противоположной относительно них стороне очага. Чтобы задать параметры моделирования, параметры очага принимались либо на основе опубликованных исследований, в которых изучалась подвижка на очаге 1908 года, либо на основе опыта с моделированием землетрясений Нортридж 1994 года, которое описано выше. Для ряда внутренних параметров очага принимались значения по умолчанию.

Функции Грина для каждой комбинации субисточник-опора вычислялись для слоистой модели полупространства, стратиграфия которого была задана на основе изысканий индивидуально для каждой опоры. Результаты расчетов позволяют ожидать, что движения грунта под северной опорой ("Torre Sicilia") более мощные, чем под южной опорой ("Torre Calabria"). Полученные серии модельных движений (примеры см. рис. 10) были пересчитаны в набор горизонтальных спектров реакции PRV(T). Медианы и среднеквадратические отклонения lgPRV для моделированных серий возможных движений грунта сравнивались затем с "опорным" спектром PRV(T), который ранее рассматривался в качестве верхней границы движений грунта вблизи моста. Полученное по серии расчетов медианное значение PRV, выше, чем опорное: приблизительно в 1.1-1.3 раза для периодов  $4 < T \le 10$  с, и до 2 раз в диапазоне периодов

 $1 < T \le 4$  с. На периодах более 10 с полученная оценка незначительно отличается от опорного значения. Стандартное уклонение индивидуальных спектров в пределах серии составляет не менее 0.2 ед. десятичного логарифма (вариации +65% / -40% относительно медианного значения). Большое разнообразие общего вида и амплитуд для вариантов модельных акселерограмм хорошо видно на рис 10г. Если принимать в качестве расчетного значения при проектировании верхний 84% квантиль средней нагрузки (медиана +1 $\sigma$ ), то это значение должно быть принято не менее чем в 1.65 раза выше медианного значения.

Использование продвинутой модели очага позволило изучить и учесть разброс индивидуальных значений *PRV* за счет естественной вариабельности среди событий с одинаковыми параметрами. Такой подход может представлять здоровую основу для детерминистических инженерных оценок будущих сильных движений.

В серии модельных расчетов мы случайно возмущали распределение финальной подвижки, локальные временные функции скорости подвижки, а также историю распространения разрыва. Значение параметра Mach принималось как случайная величина с однородным распределением в диапазоне 0.7-0.8; возможно, этот диапазон недостаточно широк. Все остальные параметры были зафиксированы. Результирующий разброс спектров реакций максимален как раз в области наиболее вероятных собственных периодов опор в диапазоне 3-10 с. Оцененные стандартные уклонения lg *PRV* для отдельной горизонтальной компоненты составляют 0.22, 0.30, 0.22 и 0.20 на периодах в 2, 5, 10 и 20 с соответственно.

Были проведены несколько тестов для того, чтобы понять насколько надежным является результат. Во-первых, был проверен эффект изменения размера субисточника. Используя сетку субисточников, разреженную вдвое  $(17\times9)$ , обнаружили, что амплитуды спектров в диапазоне T=3-20 с меняются не более, чем на 10%; а в более узком диапазоне T=5-20 с, они, в сущности, идентичны. Таким образом, можно ожидать, что в диапазоне средних - низких частот использованная здесь дискретизация очага не внесла существенной ошибки.

В другом тесте было принято масштабирование очаговых спектров согласно модели омега-квадрат Бруна в версии [Joyner, 1984], где величина сброшенного напряжения  $\Delta \sigma$  была принята равной 50 бар. Результирующие спектры реакции в диапазоне периода в 2-15 с увеличились в 1.1-1.4 раза, как и следовало ожидать из сравнения форм соответствующих спектров. Можно полагать, что использование этого варианта модели очагового спектра приводит к несколько завышенным оценкам.

#### ВЫВОДЫ

Приведенные примеры применения разработанной методики моделирования очага землетрясения показывают, что эта методика работоспособна. Она позволяет приемлемо имитировать записи реальных землетрясений, а также может применяться для характеризации сценарных (будущих возможных) движений грунта. Особый интерес представляет опыт оценки неопределенности прогнозных оценок движений грунта. Важный результат - ранжирование факторов неопределенности. Обнаружено, что в конкретных изученных условиях роль неточностей модели среды и неопределенности свойств очага сопоставима, а среди очаговых факторов наиболее выражены эффекты разброса средней скорости фронта разрыва. Однако данные результаты не имеют общего характера: ясно, что роль ряда важных факторов в конкретном исследовании события Нортридж 1994 искусственно подавлена. В первую очередь - это факторы вариаций сброшенного напряжения (по отдельности  $\delta$  и  $\delta_{HF}$ ) и

фактор расположения точки старта относительно приемника. Вклад чисто случайных вариаций деталей акселерограмм, визуально хорошо заметный, оказался невелик. Наработанный опыт позволяет рассчитывать на успешное применение данной методики в дальнейшей перспективе.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работы по землетрясению Нортридж и Мессинскому мосту были инициированы Джулиано Панца, который их энергично поддерживал. Работа была поддержана группой SAND международного центра теоретической физики, Триест (Италия) и Российским фондом фундаментальных исследований (грант 07-05-00775).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Гусев А.А.* Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеризации сейсмической опасности. 1. Обоснование и общая структура алгоритма // Вопросы инженерной сейсмологии. 20\*\*а, № \*. С. \*\*\_\*\*.
- *Гусев А.А.* Стохастическое моделирование протяженного очага землетрясения для характеризации сейсмической опасности. 2. Описание расчетных процедур // Вопросы инженерной сейсмологии. 20\*\*6, № \*. С. \*\*-\*\*.
- *Гусев А.А., Гусева Е.М., Павлов В.М.* Моделирование движения грунта при Петропавловском землетрясении 24.11.1971 (М=7.6) // Физика Земли. 2009, № 5. С. 29-38.
- Павлов В.М. Расчет смещений от статической силы в слоистом полупространстве // Вулканология и сейсмология. 2006, № 4. С. 25-33.
- Павлов В.М. Матричный импеданс в задаче расчета синтетических сейсмограмм в слоисто-однородной изотропной упругой среде // Физика Земли. 2009, № 10. С. 14-24.
- *Atkinson G.M.* Source spectra for earthquakes in eastern North America // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1993. V. 83, N 6. P. 1778-1798.
- *Bazzurro P., Sjoberg B., Luco N.* Post-elastic response of structures to synthetic ground motions // Techn. Report AT2, for PEER Lifelines Program project 1G00, AIR Worldwide Co. San Francisco, 2004.
- *Dan K., Watanabe T., Sato T., Ishii T.* Short-period source spectra inferred from variable-slip rupture models and modeling of earthquake fault for strong motion prediction // J. Struct. Constr. Engng. AIJ. 2001. V. 545. P. 51-62.
- *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, iss. 3. P. 787-808.
- *Gusev A.A.* Broadband Kinematic Stochastic Simulation of an Earthquake Source: a Refined Procedure for Application in Seismic Hazard Studies // Pure and Applied Geophysics 2011. V. 168, uss. 1-2. P. 155-200.
- *Gusev A.A., Pavlov V.M.* Wideband simulation of earthquake ground motion by a spectrummatching, multiple-pulse technique / Intl. Centre Theor. Phys. Trieste. 2006. Preprint IC2006023. 27 p. (URL: <u>http://users.ictp.it/~pub\_off/preprints-</u> sources/2006/IC2006023P.pdf).
- Gusev A. A., Pavlov V., Romanelli F., Panza G. Low-frequency seismic ground motion at the pier positions of the planned Messina Straits Bridge for a realistic earthquake scenario // In: 2008 Seismic Engineering Conference: Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake. Amer. Inst. Phys. Conf. Proc., 2008. V. 1020, iss.1. P. 362-369, DOI:10.1063/1.2963858.
- *Gusev A.A., Pavlov V.M.* Broadband simulation of earthquake ground motion by a spectrummatching, multiple-pulse technique // Earthquake Spectra. 2009. V. 25, N 2. P. 257-276.
- *Irikura K.* Predicting strong ground motions with a "Recipe" // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo 2006. V. 81. N 3-4. P. 341-352.
- Joyner W.B. A scaling law for the spectra of large earthquakes // Bull. Seism. Soc. Amer. 1984 V. 74, N 4. P. 1167-1188.
- Pavlov V.M. A convenient technique for calculating synthetic seismograms in a layered halfspace // Proc. Intern. Conf. "Problems of Geocosmos". St. Petersburg. 2002. P. 320-323.

### STOCHASTIC SIMULATION OF EXTENDED EARTHQUAKE SOURCE FOR CHARACTERIZATION OF SEISMIC HAZARD. 3. METHODS OF ANALYSIS OF UNCERTAINTY AND PRACTICAL TESTING OF THE PROCEDURE.

#### A.A. Gusev

Institute of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. And Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia.

**Abstract.** A procedure was proposed earlier for stochastic simulation of earthquake source to be used in simulation of expected strong ground motions. The procedure employs kinematic source description in a broad frequency band; the source is described as a grid of point subsources with appropriate time histories. Three examples are presented of application of this procedure for simulation of strong ground motions. To calculate ground motion from each point subsource, theoretical Green functions for layered elastic Earth were used. In two cases, imitation of recorded ground motions from real earthquakes was performed. In both cases, an acceptable fit between simulated and recorded ground motions was attained. In one of these cases, analysis of uncertainty of results was performed including contributions of inaccurately known input parameters and of purely stochastic factors. This analysis employed the original specially designed technique for uncertainty estimation. In one more case, grontd motion was simulated for scenario earthquake located at close distance from a fault.

*Keywords:* simulation, algorithm, source spectra, rupture propagation, scenario earthquake, ground motion, uncertainty

N <u>∘</u> . <sup>1</sup>	фактор/	$\sigma(p)^2$	чувствительность	чувствительность	$\sigma_{lg}(A)^3$	$\sigma_{\rm lg}(V)^3$
	параметр		$d\lg(A)/dp$	$d\lg(V)/dp$		
1	D(x,y)	—	—	—	0.054	0.051
2	$\dot{M}_{0i}(t)$	—	—	—	0.026	0.042
3	$v_{rup}(t)$	_	—	—	0.047	0.064
$\Sigma$ (стохастические)					$0.076^{4}$	$0.092^{4}$
4	Mach	—	—	—	0.052	0.079
5	$x_{nuc}, y_{nuc}$	—	—	—	0.027	0.048
6	lg $arDelta\sigma$ или $\delta$	0.1	0.31	0.42	0.031	0.041
7	$\sigma_{\mathrm{ln},t}$	0.15	0.24	0.18	0.035	0.027
8	$\sigma_{\ln,xy}$	0.15	0.06	0.10	0.009	0.015
9	$H_c$	2.5км	0.023	0.021	0.057	0.053
10	Угол падения	10°	0.0015	0.0033	0.015	0.033
11	$\log M_0$	0.1	0.3	0.4	0.03	0.04
$\Sigma$ (очаговые)					$0.11^{5}$	$0.13^{5}$
12	площадка	_	—	—	$0.14^{6}$	$0.13^{6}$
Σ (очаг+среда)					$0.18^{7}$	$0.18^{7}$

Таблица 1. Анализ неопределенности для смоделированных пиков ускорения (А) и скорости (V) для 19 станций вблизи очага землетрясения Нортридж 1994

Символ *р* обозначает произвольный фактор (любой из приведенных №№4-11).

<sup>1</sup> Номер фактора или параметра; ненумерованные ряды дают стандартное уклонение для объединенных эффектов в предположении независимости факторов.

 <sup>2</sup> Принятое значение стандартного уклонения для фактора.
 <sup>3</sup> Стандартное уклонение десятичного логарифма пиковой амплитуды на горизонтальной компоненте, осредненное по двум компонентам.

<sup>4</sup> Объединенный результат для факторов 1-3.

<sup>5</sup> Объединенный результат для факторов 1-11.

<sup>6</sup> Эмпирическая оценка для вклада фактора площадки, выведенная на основе разброса между станциями.

<sup>7</sup> Объединенный результат для факторов очага и площадки (среды).





Рисунок 1. Примеры модельных сигналов смещения в дальней зоне в однородной среде для случая одностороннего распространения разрыва в очаге землетрясения, для одного и того же разрыва и трех вариантов угла η между средним направлением распространения фронта разрыва и лучом к приемнику.



Рисунок 2. Слева: перспективный вид прямоугольника-очага и станций для землетрясения Нортридж 1994 г.,  $M_w$ =6.7. 1 - субисточник; размер кружка отражает величину сейсмического момента для конкретного прогона моделирующей программы. 2 - станция; 3 - точка старта разрыва. Координаты по осям в км. Справа: скорости сейсмического момента  $\dot{M}_{0i}(t)$  для 49 субисточников того же прогона алгоритма, а также их сумма.



Рисунок 3. Очаговые временные функции для вариантов 206 (слева) и 300 (справа). Сверху вниз: функции  $\dot{M}_0(t)$ ,  $\ddot{M}_0(t)$ , и $\ddot{M}_0(t)$  в единицах  $10^{20}$  дин см/с,  $10^{20}$ дин см/с<sup>2</sup>, и  $10^{20}$ дин см/с<sup>3</sup>, соответственно. Функции  $\dot{M}_0(t)$ ,  $\ddot{M}_0(t)$  и  $\ddot{M}_0(t)$  пропорциональны смещению, скорости и ускорению в объемной волне на луче вдоль нормали к площадке очага.



Рисунок 4. Сравнение наблюденных и модельных (вариант 206) временных функций: ускорения (а), скорости (б) и смещения (в) для двух горизонтальных компонент на пяти станциях. В каждом окошке нижняя трасса - наблюденная, верхняя модельная. Азимут компоненты указан как трехзначное число. Типы грунтов следующие: скальный грунт для станций РАС и LDM, осадочный бассейн для PAR и SYL; промежуточный («мягкая скала») для SSU. Видно, что для скальных наблюденные станций трассы ускорения имеют более резко сравнении выраженные пики в с трассами; модельными ЭТО может означать, что принятое значения  $\sigma_{\ln t}$ несколько занижено.



Рисунок 5. Невязка горизонтальных пиковых амплитуд и спектров реакции по ускорению PRA(f), для двух вариантов моделирования очага Нортридж 1994. Приведены средние значения по двум горизонтальным компонентам. В левых окошках на графиках - значения  $\Delta$ lgA средней по станциям невязки, то есть разности логарифмов «модельный минус наблюденный», для пиковых амплитуд смещения, скорости и ускорения ( $d_{pk}$ ,  $v_{pk}$  и  $a_{pk}$ ;, ромбы). Приведен также диапазон (1 $\sigma$ ) разброса невязок по 19 станциям. В правом окошке - аналогичные средние невязки для спектров реакции ускорения (кружки и серая линия). Диапазоны (1 $\sigma$ ) разброса невязок по тем же станциям приведены в этом случае как «коридор», симметричный относительно нулевой линии. Как среднеквадратический разброс, так и средняя невязка (систематический сдвиг) варьируют от одного модельного варианта очага к другому, так как каждый вариант включает существенный случайный элемент; две картины для двух вариантов иллюстрируют такие расхождения.



Рисунок 6. Область исследований и геометрия очага для Петропавловского землетрясения 1971.11.24. а – карта, эпицентр обозначен звездой, серый штриховой эллипс – это поверхность разрыва (ее угол падения близок к вертикальному), которая построена на основании гипоцентров афтершоков и иных данных; б – перспективный вид принятой модели очага с модельными субисточниками. 1 – станция, 2 - субисточник, 3 - точка старта разрыва, 4, 5 – края площадки разрыва. Размеры символа субистоника пропорциональны величине его сейсмического момента.



Рисунок 7. Один из вариантов модельного сильного движения (верхний в каждом окошке) в сравении с наблюденным (нижний в окошке). Относительный сдвиг по времени подобран на глаз. Оба рода данных прошли через одинаковый высокочастотный фильтр с частотой отсечки 0.07 Гц. Сверху вниз: ускорение, скорость и смещение; слева - компонента NS, справа - компонента EW. Если бы фильтрация не применялась, то модельные смещения показывали бы наличие остаточной подвижки, составляющей 2 см к югу и 3.5 см к западу.



Рисунок 8. Амплитудные спектры Фурье для модельного (см. рис 5) и наблюденного смещения (а, г) и ускорения (б, в, д, е). 1 - модельный спектр без фильтрации, 2- то же, после фильтрации (соответствует рис. 6), 3 -наблюденный спектр (с фильтрацией). Верхний ряд – NS, нижний ряд – EW. Шкала амплитуд логарифмическая. Шкала частот для а, б, г и д логарифмическая. Для в и е использована натуральная шкала, чтобы показать приемлемый выбор спектрального параметра затухания *к*, который отражает, в основном, затухание на трассе. Спектры сглажены окном 0.1 декады.



Рисунок 9. Область исследований и модель очага для гипотетического землетрясения в Мессинском проливе. *а* – карта, заштрихованный прямоугольник – предполагаемый очаг, звездочка – предполагаемый эпицентр для "худшего случая"; планируемые опоры моста обозначены как TSI ("Torre Sicilia") и TCA ("Torre Calabria"). *б* – перспективный вид варианта модели очага. Каждый субисточник - серая точка, ее размер отражает сейсмический момент субисточника.



Рисунок 10. Модельные движения грунта для площадки TSI. В колонках *a*, *б*, *в* – по три компоненты смещения (*a*), скорости (*б*) и ускорения (*в*) для варианта счета 222. На графиках *a* видно заметное остаточное смещение. *г* – варианты ускорения (NS), полученные в девяти прогонах моделирующей программы; иллюстрируют изменчивость модельных сигналов.