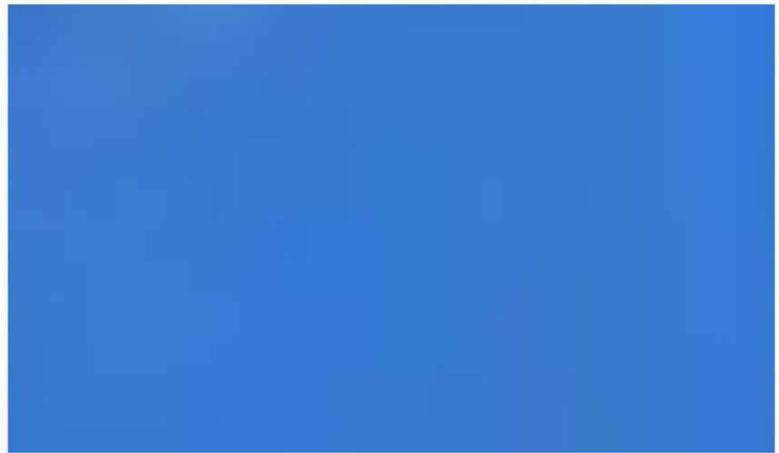


ISSN 0039-2383

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



СЦЕНАРНОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В Г. МОСКВА: ПАРАМЕТРЫ И МОДЕЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА

А.А. Гусев¹, О.В. Павленко²

¹ИВиС ДВО РАН и КФ ГС РАН, Петропавловск-Камчатский

²ИФЗ РАН, Москва

Перепечатано с иллюстрациями в цвете из журнала

Строительная механика и расчет сооружений, 2009, №4, С. 55-72.

Аннотация

Оценены параметры сценарного землетрясения, пригодного для детерминистической оценки сейсмической опасности для г. Москвы. Максимальный сейсмический эффект на территории г. Москвы ожидается от очагов крупных восточно-карпатских землетрясений (из зоны Вранча) на глубинах 80-150 км. Оценку параметров колебаний при предельно сильных ($M=8$) таких землетрясениях можно выполнить путем экстраполяции характеристик колебаний, записанных от подобных землетрясений умеренной магнитуды на цифровой аппаратуре сейсмической станции «Москва». Для сценарного землетрясения и для грунта ст. «Москва» таким путем построены средние спектры Фурье и спектры реакции (при 5%-м затухании) колебаний поверхности грунта, оценены максимальные ускорения и скорости, построена серия модельных синтетических акселерограмм. Грунтовые условия на с/ст. Москва предлагается принять за эталонные для территории Москвы, а оценку параметров сейсмических воздействий в других пунктах проводить на основе результатов сейсмического микрорайонирования с использованием частотно-зависимых поправок к спектрам.

Введение.

Согласно действующим нормативным картам ОСР-97 и заключениям Отчета ИФЗ РАН по оценке возможных сейсмических воздействий на территории г. Москвы от 2004 г., территория г. Москвы расположена в зоне 5-балльных сейсмических сотрясений, превышение которых в течение 50 лет возможно с вероятностью менее 1% (карта ОСР-97-С). Местных землетрясений тектонического происхождения в пределах города и его окрестностей инструментально не зарегистрировано, максимальный сейсмический эффект на территории г. Москвы ожидается от очагов удаленных сильных землетрясений. В качестве удаленного опасного события принято землетрясение, очаг которого расположен в Восточных Карпатах, (зона Вранча, Румыния), на глубинах 80-150 км. Моментные магнитуды M_w сильнейших известных там землетрясений приближаются к 8.0. При жестком задании M_w разброс высокочастотных ($T < 5$ с) амплитуд в большой мере определяется величиной сброшенного напряжения в очаге. Рекомендательный для инженерных расчетов уровень высокочастотных амплитуд колебаний при сценарном землетрясении целесообразно принять равным определенному, (например, 84%-му) верхнему квантилю распределения (разброса) этих амплитуд. В настоящей работе выполняется сейсмологически обоснованная оценка параметров колебаний грунта при сценарном землетрясении на эталонном грунте в г. Москва в целях применения для расчетов на сейсмостойкость. Такая оценка проводится на основе анализа записей землетрясений умеренной магнитуды, полученных сейсмостанциями «Москва» и «Обнинск».

Применены оригинальные методики, которая позволили использовать имеющийся материал малого объема и не вполне адекватного качества для получения устойчивых и обоснованных оценок. Исследование включало следующие этапы:

(1) Выбор параметров потенциально опасного землетрясения и характеристик разброса его высокочастотных ($T < 5$ с) амплитуд, выбор подхода к оценке его колебаний путем

экстраполяции от параметров землетрясений умеренной магнитуды; пути учета отклонений от подобия очагов разных магнитуд при экстраполяции.

(2) Анализ цифровых записей землетрясений Вранча умеренных магнитуд на ст. «Москва» и «Обнинск», осреднение и экстраполяция спектров Фурье.

(3) Разработка алгоритма для методики «Экстраполяция спектров Фурье» и выполнение расчетов для синтеза акселерограмм по заданным параметрам спектров и длительности.

(4) Контроль и модификация результатов экстраполяционных расчетов на основании наблюдений сильных землетрясений зоны Вранча на ст. Москва.

(5) Контроль результатов экстраполяционных расчетов на основании моделирования зависимостей от магнитуды максимальных амплитуд скоростей и ускорений грунта на ст. Москва от землетрясений Вранча.

(6) Дублирующий расчет модельных движений грунта методом «эмпирических функций Грина»; выбор окончательного рекомендуемого варианта амплитуд.

1. Основы экстраполяции к предельно большой магнитуде спектров колебаний от землетрясений умеренной магнитуды, выбор сценарного землетрясения

Как отмечено выше, максимальный сейсмический эффект на территории г. Москвы ожидается от заглубленных очагов крупных восточно-карпатских землетрясений (из зоны Вранча). Оценку параметров колебаний от землетрясений из зоны Вранча при предельно сильных событиях в этой зоне можно выполнить путем экстраполяции характеристик колебаний, записанных от подобных землетрясений умеренной магнитуды на цифровой аппаратуре ст. «Москва» (MOS). Относительно надежные цифровые записи землетрясений очаговой зоны Вранча на MOS имелись за период 1999-2005 гг., когда в этой зоне происходили землетрясения с магнитудой M_w до 5.9, точнее из диапазона моментных магнитуд $M_w = 5.0-5.9$.

Принципы оценки спектров путем экстраполяции к большим магнитудам. Чтобы оценить ожидаемый уровень колебаний поверхности на ст. «Москва» при сильных событиях зоны Вранча следует разработать методику экстраполяции спектров колебаний к M_{max} . В этой методике будет использована простейшая модель очагового спектра «омега - квадрат» по Аки-Бруну [Brune, 1970].

Введем функцию $M_0(t)$ изменения во времени сейсмического момента (момента точечного силового диполя), эквивалентного очагу землетрясения, и ее производную $\dot{M}_0(t)$. Очаговый спектр землетрясения, или амплитудный спектр функции скорости изменения сейсмического момента $\dot{M}_0(t)$ примем в виде

$$\dot{M}_0(f) = \frac{M_0}{1 + (f/f_c)^2}, \quad (1)$$

где f_c – параметр «корнер-частота» (верхняя частота среза спектра), а M_0 – скалярный сейсмический момент. Последний жестко связан с моментной магнитудой, которая определена как

$$M_w = (2/3) (\lg M_0 - 10.7). \quad (2)$$

Спектр ускорения движения грунта $a(f)$ вдали от очага пропорционален спектру третьей производной от $M(t)$, $\ddot{\ddot{M}}(f)$, и может быть записан как

$$a(f) \sim \ddot{\ddot{M}}(f) = \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1 + (f/f_c)^2}. \quad (3)$$

На высоких частотах, когда f заметно выше f_c

$$a(f) \sim f_c^2 M_0 = A_{HF}, \quad (4)$$

так что здесь $a(f)$ приблизительно постоянна и не зависит от частоты. Поэтому законно обсуждать обобщенный высокочастотный амплитудный параметр A_{HF} .

Значение f_c в модели Бруна определяется через M_0 и очаговый параметр «сброшенное напряжение» $\Delta\sigma$ как

$$f_c(M_0, \Delta\sigma) = 4.9 \cdot 10^6 \beta (\Delta\sigma/M_0)^{1/3}, \quad (5)$$

где β - скорость поперечных волн в очаговой зоне (км/с), $\Delta\sigma$ - в бар и M_0 - в дин·см.

На этой основе можно получить для записей двух землетрясений с близкими очагами на одной станции отношение амплитудных спектров $SR(f)$, которое может служить как поправочный коэффициент для перехода от спектра ускорений для очага со значениями параметров $(M_0^{(1)}, \Delta\sigma^{(1)})$ к спектру ускорений для другого очага с параметрами $(M_0^{(2)}, \Delta\sigma^{(2)})$:

$$SR(f | M_0^{(1)}, \Delta\sigma^{(1)}, M_0^{(2)}, \Delta\sigma^{(2)}) = \frac{M_0^{(2)} \left(1 + \left(\frac{f}{f_c(M_0^{(1)}, \Delta\sigma^{(1)})} \right)^2 \right)}{M_0^{(1)} \left(1 + \left(\frac{f}{f_c(M_0^{(2)}, \Delta\sigma^{(2)})} \right)^2 \right)}. \quad (6)$$

Эта формула и была использована для приведения наблюдаемых спектров, которым было приписано значение сброшенного напряжения $\Delta\sigma = 30$ бар, сначала к единому опорному случаю $\Delta\sigma = 200$ бар ($M_w = 8.0$), а затем от опорного случая к случаю сценарного события.

Как известно, значение $\Delta\sigma$ для многих совокупностей землетрясений мало зависит от магнитуды (явление подобия). Это, однако, неверно для землетрясений зоны Вранча. Как установили Гусев и др. [Gusev et al., 2002], в диапазоне моментных магнитуд $M_w = 4 - 6.7$ очаговые спектры землетрясений зоны Вранча аналогичны типичным спектрам землетрясений хорошо изученного региона Калифорнии с $\Delta\sigma = 30$ бар, в то время как при $M_w > 6.7$ спектры резко меняют свой характер и близки к аномальным спектрам Калифорнии с $\Delta\sigma = 100-200$ бар. Причины подобной аномалии неизвестны. Поскольку, как можно видеть из (4) и (5), при заданном M_0

$$A_{HF} \sim \Delta\sigma^{2/3}, \quad (7)$$

то на основе известного изменения сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ можно оценить дополнительное изменение A_{HF} , что будет использовано далее.

Переход от экстраполированного амплитудного спектра Фурье колебаний грунта к амплитудам и спектрам реакции целесообразно проводить в два этапа. Сначала по спектру Фурье и огибающей с определенной длительностью синтезируется серия модельных акселерограмм. Этот шаг не представляет принципиальных трудностей, так как длительность колебаний можно считать хорошо известной. При толчках Вранча умеренной силы она составляет ориентировочно 150-200 секунд, и эти характеристики в данном случае пригодны и для сильнейших событий. Причина в том, что даже для далее предложенной магнитуды $M=8$ и высоких значений сброшенного напряжения, длительность очагового процесса составит не более 15-20 с. В этих условиях вклад очага в длительность через зависимость длительности очагового процесса от магнитуды мал. Этим вкладом можно уверенно пренебречь и использовать при синтезе акселерограмм огибающие, полученные при наблюдениях для толчков Вранча умеренной силы.

На втором этапе по серии акселерограмм определяются амплитуды скорости и ускорения и спектры реакции. Амплитуды смещений надежно по применяемой методике не

определяются, так как записи в Москве при толчках Вранча умеренной силы на низких частотах тонут в шуме, а без этой части спектра смещения сколько-нибудь надежно оценить нельзя.

Характеризация сценарного события. Был принят следующий принцип выбора сценарного сейсмического события. Сначала выбиралось значение предельно высокой моментной магнитуды M_w для рассматриваемой очаговой зоны - землетрясения промежуточной глубины, $h = 80-200$ км, в зоне Вранча. Для «типичного» события этого класса оценивались амплитудные параметры колебаний. Затем рассматривалась возможность отклонений амплитуд высокочастотных (т.е. с частотами 0,3 – 10 Гц или с периодами 0.1 – 3 с) колебаний от среднего уровня за счет природного разнообразия спектров. (Поясним, что задание моментной магнитуды M_w достаточно жестко фиксирует уровень спектра для низкочастотных, длиннопериодных колебаний.) В силу такого разброса, оценки, полученные для типичного события, нельзя считать окончательными, следует учесть, что амплитуды высоких частот могут отклониться вверх относительно таковых для типичного события.

Для систематического учета названных отклонений принимают, что разнообразие спектров можно описать статистически. «Типичному» событию приписывают смысл медианного, так что амплитуды высокочастотных колебаний для событий выше и ниже «типичного» имеют равные вероятности появления – по 50%. Расчетное сценарное событие выбирают более сильным, чем типичное, причем нередко принимают для него 84% верхний квантиль распределения разброса амплитуд. Это означает, что 84% случайных событий имеют амплитуду высокочастотных компонент ниже расчетной, а 16% - амплитуду выше расчетной. Иными словами, события с высокочастотной амплитудой, равной или выше расчетной, происходят приблизительно в 16% случаев (это приблизительно каждое шестое событие). Далее мы следуем такому подходу.

Предполагают обычно, что разброс амплитуд колебаний высоких частот следует логнормальному закону распределения. Обозначим такую амплитуду обобщенно A_{HF} . Значение $\lg A_{HF}$ для типичного события обозначим как $\lg A_{HF50}$ и рассмотрим отклонения индивидуальных амплитуд A_{HF} от $\lg A_{HF50}$, которые будем обозначать $\delta \lg A_{HF}$. Итак, по определению:

$$\delta \lg A_{HF} = \lg A_{HF} - \lg A_{HF50} \quad (8)$$

Для $\delta \lg A_{HF}$ предполагается справедливым нормальный закон распределения со стандартным отклонением (с.к.о.), равным $\sigma(\lg A_{HF})$. Теперь ясно, в чем смысл задания именно 84% верхнего квантиля распределения разброса амплитуд: для нормального закона он соответствует уровню логарифма спектра, равному (среднее + 1.0×стандартное уклонение). Мы будем принимать, с некоторой долей упрощения, что параметр $\sigma(\lg A_{HF})$ описывает и разброс спектральных амплитуд ускорения $\sigma(a(f))$, и разброс максимальных ускорений $\sigma(\lg A)$. Это оправдано, так как главным фактором, вызывающим различие в поведении спектра Фурье и амплитуды во временной области, является изменение длительности колебаний, а в данном случае длительность приблизительно постоянна. В силу обычного принимаемого соотношения $I \sim 0.3 \lg A$ (где I – интенсивность в баллах), принимаем также, что для разброса балла в эпицентре I_0 при фиксированной M_w , $\sigma(I_0) = 0.3 \sigma(\lg A_{HF})$.

Таким образом, для практического применения экстраполяции нужно охарактеризовать сценарный вариант очага, для чего надо решить две задачи: (1) дать оценку предельной магнитуды (обозначим ее M_{max}); (2) оценить $\sigma(\lg A_{HF})$.

Выбор конкретных значений параметров M_{max} $\sigma(\lg A_{HF})$ для сценарного события. Для получения оценок M_{max} и $\sigma(I_0)$ был использован каталог зоны Вранча ROMPLUS, [Gusev et al., 2002], где первое событие датируется 984 г.н.э. (Рисунок 1).

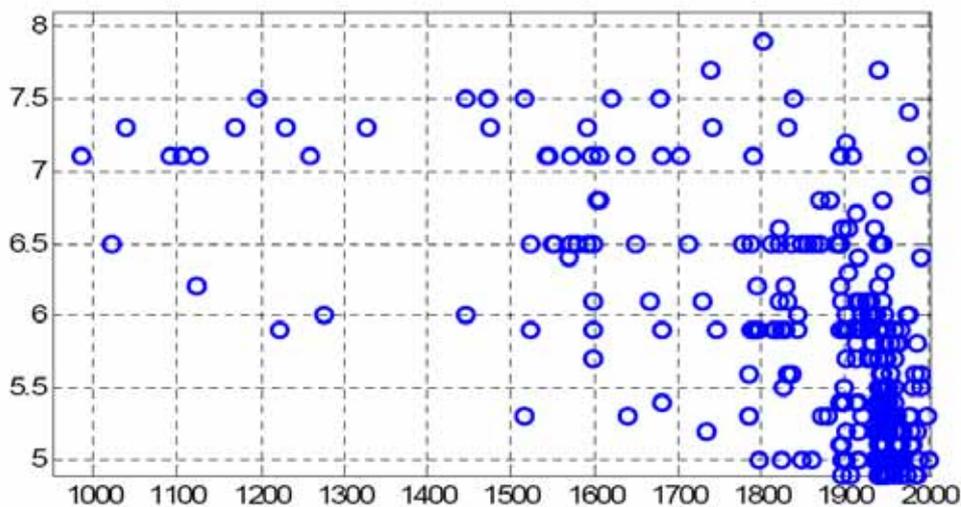


Рис. 1. Магнитуда каталога ROMPLUS (ордината) в зависимости от календарного времени (абсцисса).

Каталог составлен в моментных магнитудах M_w . Однако его начальная часть, построенная по макросейсмическим данным, имеет значения M_w , полученные не непосредственно и даже не на основе инструментальных данных, а пересчетом по корреляционным формулам из эпицентральной сейсмической интенсивности (балльности) I_0 . В результате по этому материалу невозможно оценить параметр разброса $\sigma(I_0)$, поскольку он автоматически будет ближе к нулю. Оценка $\sigma(I_0)$ поэтому выполнялась только по данным 1925-2001 гг.

Тот же факт создает проблемы и для оценки M_{max} . Формально, три наиболее крупных сейсмических события – это землетрясения 1738 г. ($M = 7.7$), 1802 г. ($M = 7.9$) и 1940 г. ($M = 7.7$). Ясно, однако, что первые две цифры получены пересчетом из I_0 и недостоверны как значения собственно магнитуды M_w . За инструментальный период (с 1899 г.; надежнее – с 1925 г.) сильнейшее событие в шкале M_w – это событие 1940 года. С точки зрения величины I_0 , наиболее мощное событие за 1000 лет – это землетрясение 1802 года ($I_0 = 10$). С учетом этой скудной информации, в качестве предельного для зоны Вранча выбрано значение M_w равное $M_{max} = 8.0$.

Для оценки $\sigma(A_{HF})$ использованы данные об I_0 и M_w за 1925- 2002 годы. На Рисунке 2 приведены данные M_w и I_0 для диапазона $M_w = 4.0-8.0$.

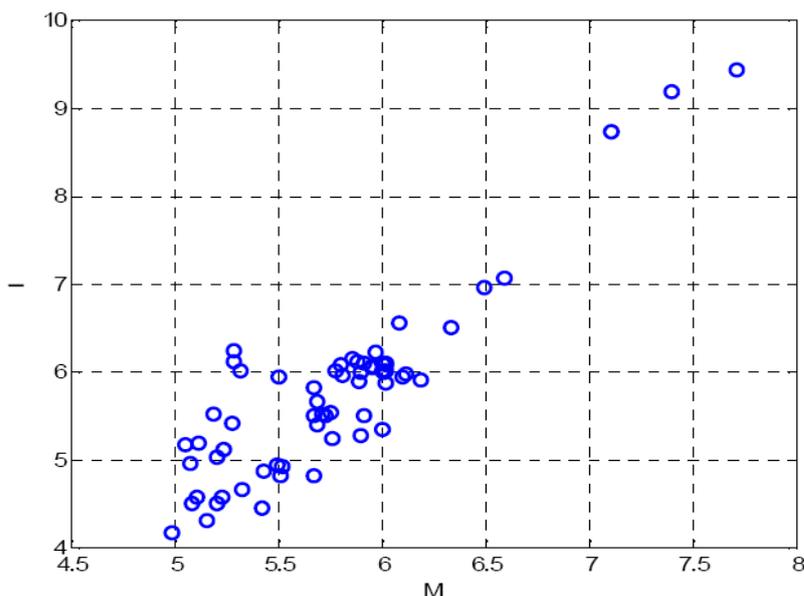


Рис. 2. Балл в эпицентре как функция магнитуды

Видно, что для $M_w < 5$ данные I_0 явно урезаны, что создает затруднения при оценке связи $I_0(M_w)$ и в результате – при оценке $\sigma(I_0)$. Поэтому уравнение связи между I_0 и M_w было найдено методом подбора. Оно имеет вид:

$$I_{00}(M_w) = 1.4(M - 6) + 6.1 \quad (9)$$

На Рисунке 3 приведены невязки $\delta I = I_0 - I_{00}(M_w)$, в функции M_w . Видно, что данные приемлемо приближаются принятой формулой в диапазоне $M_w = 5-6.7$, но три точки с $M_w > 6.7$ не укладываются в эту тенденцию и выдают невязку, близкую к $\delta I = 1.1$ балла. Можно ожидать, что аномалия такого рода характерна вообще для очагов событий с $M > 6.7$ в зоне Вранча. При пересчете к $\lg A_{HF}$ эта аномалия дает оценку приращения $\delta \lg A_{HF} = \delta \lg A_{HF}^{(6.7)} = +0.33$.

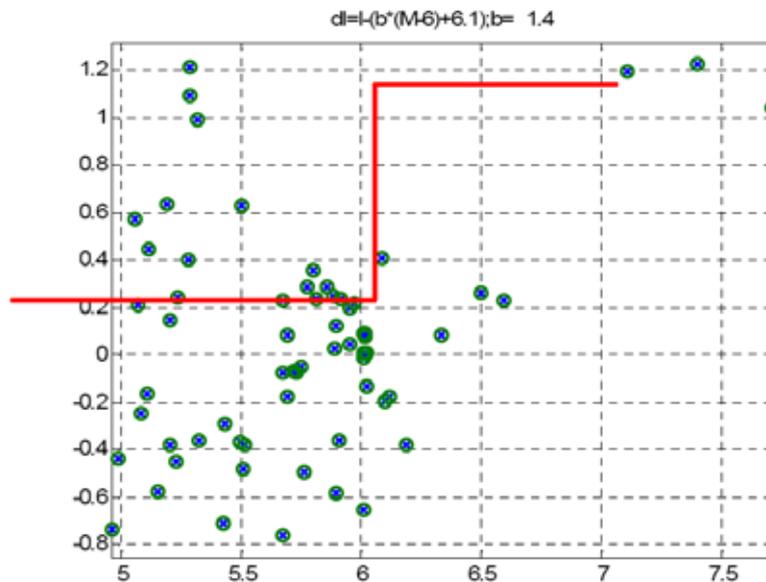


Рис. 3. Значение δI отклонения I_0 от средней зависимости $I_{00}(M_w)$ (ордината), в функции M_w (абсцисса).

Идея аномальности спектров землетрясений Вранча при больших магнитудах высказывалась и ранее [Gusev et al., 2002]. При этом и характер спектральной аномалии (относительное увеличение A_{HF}), и ее положение на оси магнитуд вполне идентичны полученным здесь результатам анализа данных о балльности. Таким образом, идея наличия аномалии зрения поддерживается двумя независимыми источниками информации и должна быть учтена при дальнейших расчетах.

Выбор самого значения $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)}$ для использования в работе следует обсудить детальнее. Спектральная аномалия при больших магнитудах, найденная в работе [Gusev et al., 2002], может быть пересчитана в оценки $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)}$ следующим образом. По данным работы [Gusev et al., 2002]. типичное значение сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ при переходе области магнитуд близких к $M_w = 6.7$ изменяется от примерно 30 бар при низких M_w до примерно 150 бар при высоких магнитудах, или в 5 раз; это дает изменение $\lg \Delta\sigma$, обозначаемое далее $\delta \lg \Delta\sigma$, равное $\delta \lg \Delta\sigma = 0.70$. Далее, из уравнения (7) следует, что в рамках модели омега-квадрат, для случая фиксированной M_w , имеет место следующая связь между отклонениями параметров $\delta \lg A_{HF}$ и $\delta \lg \Delta\sigma$ от их типичных значений:

$$\delta \lg A_{HF} = (2/3) \delta \lg \Delta\sigma, \quad (10)$$

В нашем случае это позволяет оценить скачок величины $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)}$ при переходе магнитуды через значение 6.7, на основании известного скачка $\delta \lg \Delta\sigma = 0.70$. Этот прием дает оценку

$\delta \lg A_{HF}^{(6.7)} = 0.466$. Численную оценку $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)} = 0.33$, полученную косвенным путем с использованием данных о макросейсмической интенсивности (балльности) мы сочли относительно менее надежной, и в качестве окончательной приняли сводную оценку $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)} = 0.45$.

Оставив упомянутые аномальные сильные события в стороне, по данным Рисунка 3 можно построить гистограмму невязок δI и их эмпирическую кумулятивную функцию распределения невязок (Рис. 4).

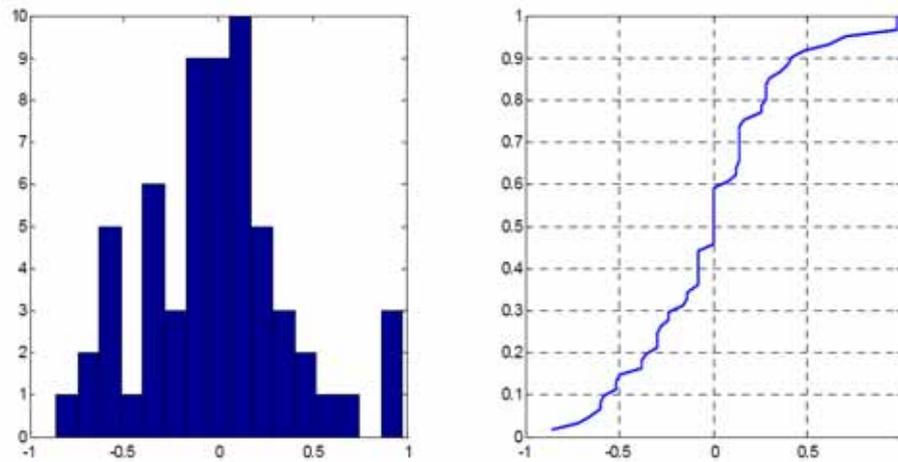


Рис. 4 Гистограмма невязок δI (слева) и их эмпирическая кумулятивная функция распределения (справа).

Видно, что распределение невязок не слишком сильно отличается от Гауссова. По интервалу между 16% и 84% квантилями, который для нормального закона равен удвоенному среднеквадратическому отклонению (с.к.о. или σ) можно получить оценку $\sigma(\delta I_0) = 0.45$. Это дает, с учетом вышеизложенного, оценку $\sigma(\lg A_{HF}) = 0.30 \cdot 0.45 = 0.135$.

Подобный полученный уровень разброса для $I(M_w)$ и $A_{HF}(M_w)$ чрезвычайно низок, поскольку типичные региональные средние значения составляют $\sigma(\delta I) = 0.8-1.0$ и $\sigma(\lg A_{HF}) = 0.24-0.3$, соответственно. Для объяснения этих расхождений приходится делать дополнительные предположения. Можно, в частности, допустить, что зона Вранча обладает необычно высокой однородностью спектров и амплитуд. Другая, на наш взгляд, более вероятная возможность – тот факт, что калибровка каталога ROMPLUS в терминах M_w несовершенна. Для промежуточных очагов основной рабочей магнитудой до введения M_w в практику сейсмических служб являлась среднепериодная магнитуда m_{PV} , и значения M_w каталога ROMPLUS определяли из нее по корреляционным связям. Однако корреляция m_{PV} с I_0 по теоретическим соображениям должна быть более тесной, чем для M_w . Эта тесная связь сохраняется и после пересчета m_{PV} в оценки M_w . Таким образом, низкое значение $\sigma(\delta I_0) = 0.45$ с большой вероятностью является артефактом.

Поэтому в дальнейшем использовали оценку $\sigma(\lg A_{HF})$, полученную по обширным материалам других регионов. Такая оценка сочтена более надежной. Практически выбрали два варианта данной величины: минимальный, $\sigma(\lg A_{HF}) = 0.24$ и опорный $\sigma(\lg A_{HF}) = 0.30$. Последнее значение основано на наиболее авторитетном современном источнике по данному вопросу – справочнике-энциклопедии «*Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*». В главе «Strong Motion Seismology», написанной Дж. Андерсоном, типичное значение указанного параметра дается как 0.70 в единицах натурального логарифма, что дает 0.3040 в единицах десятичного логарифма. Округленно можно принять обсуждаемый параметр равным $0.3010 = \lg 2$. Мы также будем предполагать, что данное значение $\sigma(\lg A_{HF})$ является приемлемым вдоль всей шкалы магнитуд, и в частности, в области M_{max} . Такое предположение имеет в определенной мере гипотетический характер, но использование подобных гипотез неизбежно на практике в силу полной невозможности накопить статистику A_{HF} при событиях предельной магнитуды, разделенных во времени интервалами не менее 100 лет.

Выводы раздела:

1. Экстраполяцию спектров Фурье можно вести на основе спектральной модели Бруна.
2. Предельную магнитуду M_w для зоны Вранча можно принять равной 8.0.
3. Значение $\sigma(\lg A_{HF})$ в области M_{max} можно принять равным 0.24-0.30.
4. При экстраполяции $\lg A_{HF}$ от умеренных магнитуд к M_{max} следует ввести поправку, учитывающую аномальный скачок A_{HF} вверх (относительно прогноза по гипотезе подобия) при магнитуде около 6.7, равную $\delta \lg A_{HF}^{(6.7)} = +0.45$.

2. Анализ записей землетрясений зоны Вранча, зарегистрированных в г. Москве (ст. «Москва») и вблизи Москвы (ст. «Обнинск»)

Характеристика сейсмограммного материала. Для реализации методики экстраполяции необходимо иметь исходный материал в виде цифровых сейсмограмм землетрясений Вранча умеренной магнитуды. Начиная с 1990 года ведется регистрация сейсмических событий цифровой аппаратурой на сейсмостанции Обнинск (OBN), а начиная с 1999 года – также на сейсмостанции Москва (MOS). В обоих случаях записываются широкополосные велосигаммы землетрясений с частотой дискретизации 20 Гц. Записи двух более сильных землетрясений Вранча 1990 года на станции Обнинск на высокочувствительных каналах зашкалены по амплитуде (некондиционные). Получены частичные записи низкочувствительных каналов: на двух компонентах они неполные, и только на одной компоненте землетрясения записаны полностью: событие 30.05 на канале Z и событие 31.05 – на канале EW.

В Таблице 1 представлен каталог землетрясений из зоны Вранча с моментными магнитудами, превышающими 5. Можно полагать, что при этом были отобраны практически все события с моментной магнитудой выше 5.3, амплитуда которых заметно превышает микросейсмический шум. Выполнен анализ записей 12-ти событий, зарегистрированных станцией Обнинск с 1992 по 2005 г., и записи 9-ти событий, зарегистрированных станцией Москва с 1999 по 2005 г. Для всех анализируемых землетрясений рассчитаны спектры Фурье и спектры реакции. На Рисунке 5 представлены акселерограммы наиболее сильного за этот период землетрясения 27.10.2004 г., записанного сейсмостанциями Обнинск и Москва (акселерограммы пересчитаны из зарегистрированных велосигамм с введением поправок за частотные характеристики регистрирующей аппаратуры). На Рисунке 6 показаны спектры Фурье (сглаженные в окне 1/3 октавы) и спектры реакции (для затухания $D=5\%$), рассчитанные для этого землетрясения. Подчеркнем, что при фактической частоте дискретизации 20 Гц, спектры Фурье на частотах выше 3-4 Гц неизбежно несколько занижены. Соответственно и спектры реакции могут недооценивать истинных амплитуд. (Уровень соответствующих графиков спектров выше 3-4 Гц может быть занижен, но само изображение спектра реакции для произвольно высоких частот закономерно, в отличие от спектра Фурье.)

В Таблице 2 представлены моментные магнитуды M_w землетрясений из зоны Вранча, записи которых анализируются, эпицентральные расстояния и параметры вызванных ими колебаний поверхности на станциях Обнинск и Москва: пиковые ускорения, пиковые скорости на горизонтальных и вертикальных компонентах (в порядке EW-, NS- и Z-компоненты), интервал дискретизации (шаг по времени Δt), а также продолжительность колебаний, оцененная для 3-х компонент (EW, NS и Z) двумя способами: (1) как продолжительность колебаний, превышающих по амплитуде уровень 50% пиковых значений и (2) как длительность участка записи, соответствующего 80% энергии всей записи. Магнитуды M_w оценивались по приведенным в каталоге магнитудам m_b на основе результатов исследования [Гусев, Мельникова, 1990]. Длительность обработанных записей составляла порядка 12 минут; спектры Фурье и спектры реакции рассчитывались в окнах S-волн длительностью около 200 секунд.

Таблица 1. Каталог землетрясений Восточных Карпат с $M_w > 5.0$ с 1965 года по настоящее время

Дата	время	широта	долгота	глубина	магнитуда	интенсивность	станция
1965/01/10	02:52:23.90	45.800	26.600	128.0	5.3 Mb	0.00	
1966/10/02	11:21:44.80	45.700	26.500	140.0	5.2 Mb	0.00	
1973/08/20	15:18:28.30	45.735	26.477	73.0	5.6 Mb	0.00	
1974/07/17	05:09:23.00	45.750	26.531	145.0	5.1 Mb	0.00	
1976/10/01	17:50:43.20	45.681	26.492	146.0	5.2 Mb	0.00	
1977/03/04	19:21:54.10	45.772	26.761	94.0	6.4 Mb	0.00	
1978/10/02	20:28:52.60	45.725	26.479	164.0	5.0 Mb	0.00	
1979/05/31	07:20:06.30	45.552	26.327	120.0	5.1 Mb	0.00	
1979/09/11	15:36:54.20	45.560	26.298	154.0	5.1 Mb	0.00	
1981/07/18	00:02:59.46	45.618	26.339	152.0	5.0 Mb	0.94	
1985/08/01	14:35:03.14	45.711	26.506	107.3	5.3 Mb	1.03	
1986/08/30	21:28:35.45	45.547	26.316	132.3	6.4 Mb	1.11	
1990/05/30	10:40:06.14	45.841	26.668	89.3	7.1 Mb	1.03	
1990/05/31	00:17:47.85	45.811	26.769	88.2	6.5 Mb	1.03	
1992/11/21	12:55:49.08	45.671	26.656	136.7	5.2 Mb	1.00	OBN
1993/08/26	21:32:33.31	45.727	26.565	135.5	5.0 Mb	1.16	OBN
1998/03/13	13:14:37.57	45.612	26.299	153.9	5.0 Mb	1.03	OBN
1999/04/28	08:47:55.49	45.464	26.183	155.9	5.4 Mw	0.87	OBN, MOS
2000/04/06	00:10:38.78	45.743	26.580	132.6	5.4 Mw	1.03	OBN, MOS
2001/05/24	17:34:01.02	45.688	26.416	141.6	5.3 Mw	1.08	OBN, MOS
2001/07/20	05:09:39.67	45.749	26.734	128.6	5.3 Mw	1.12	OBN, MOS
2002/11/30	08:15:46.80	45.726	26.568	162.5	5.0 Mb	0.98	OBN, MOS
2004/09/27	09:16:23.92	45.690	26.480	145.0	5.2 Mb	1.03	OBN, MOS
2004/10/27	20:34:36.81	45.787	26.622	95.8	5.9 Mw	0.94	OBN, MOS
2005/05/14	01:53:20.66	45.684	26.437	148.9	5.2 Mw	0.00	OBN, MOS
2005/06/18	15:16:42.41	45.714	26.695	138.7	5.0 Mw	1.02	OBN, MOS

OBN – сейсмостанция Обнинск, MOS – сейсмостанция Москва

Таблица 2. Параметры колебаний поверхности на ст. Обнинск и Москва при землетрясениях зоны Вранча

Дата	глубина	M_w	эп. р., км	a_{max} , мкм/с ²			v_{max} , мкм/с			Δt , с	длительность, с					
ст. Обнинск OBN																
1992/11/21	136.7	5.2	1231	157	148	149	19.7	20.0	8.4	0.05	123	150	81	115	120	211
1993/08/26	135.5	5.0	1230	47	59	21	7.5	8.9	2.8	0.05	206	128	127	126	135	247
1998/03/13	153.9	5.0	1251	68	67	26	10.3	10.3	4.0	0.05	230	100	77	107	113	291
1999/04/28	155.9	5.4	1270	190	246	154	28.8	36.3	12.4	0.025	125	120	191	142	129	245
2000/04/06	132.6	5.4	1228	85	111	30	13.2	17.6	4.3	0.05	119	112	250	125	117	244
2001/05/24	141.6	5.3	1240	155	225	99	21.2	28.4	8.6	0.025	148	199	235	121	114	238
2001/07/20	128.6	5.3	1221	238	262	115	30.5	33.3	6.9	0.025	245	146	67	106	109	222
2002/11/30	162.5	5.0	1230	86	110	99	12.2	16.1	5.8	0.025	135	189	184	105	108	220
2004/09/27	145.0	5.2	1237	46	59	89	5.3	6.8	3.6	0.025	161	192	82	261	304	234
2004/10/27	95.8	5.9	1222	728	868	358	117.8	154.0	43.5	0.05	219	117	124	134	135	249
2005/05/14	148.9	5.2	1239	81	87	35	11.0	12.5	3.5	0.05	125	109	135	129	129	236
2005/06/18	138.7	5.0	1226	82	105	120	13.7	16.9	7.2	0.05	223	120	131	140	118	213
ст. Москва MOS																
1999/04/28	155.9	5.4	1365	182	182	49	19.3	22.1	7.1	0.05	103	241	249	264	267	286
2000/04/06	132.6	5.4	1323	60	71	28	11.0	8.9	5.0	0.05	106	105	259	299	275	338
2001/05/24	141.6	5.3	1335	142	169	67	16.0	19.4	9.1	0.05	126	88	236	299	251	286
2001/07/20	128.6	5.3	1316	128	155	56	15.2	15.6	6.0	0.05	222	109	260	379	340	392
2002/11/30	162.5	5.0	1325	59	72	77	8.3	8.7	5.1	0.05	289	303	248	292	295	341
2004/09/27	145.0	5.2	1332	45	48	23	3.0	3.3	1.7	0.05	-	-	-	-	-	-
2004/10/27	95.8	5.9	1317	629	589	221	60.0	65.6	51.0	0.05	114	202	234	240	243	275
2005/05/14	148.9	5.2	1334	41	45	23	5.3	5.9	3.2	0.05	283	241	289	328	489	380
2005/06/18	138.7	5.0	1321	67	50	38	6.3	4.6	2.7	0.05	299	287	236	301	278	284

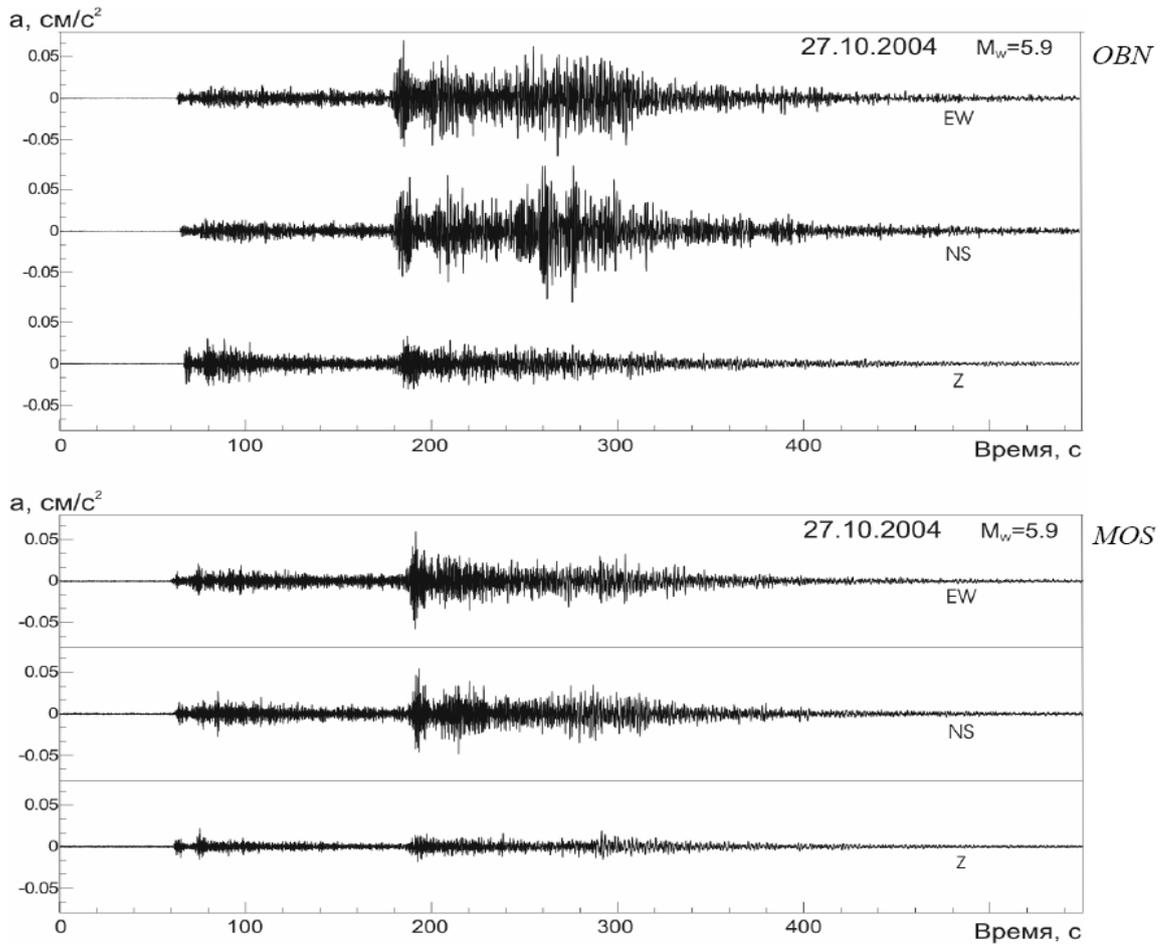


Рис. 5. Акселерограммы землетрясения 27.10.2004 г., записанные ст. Обнинск (вверху) и ст. Москва (внизу).

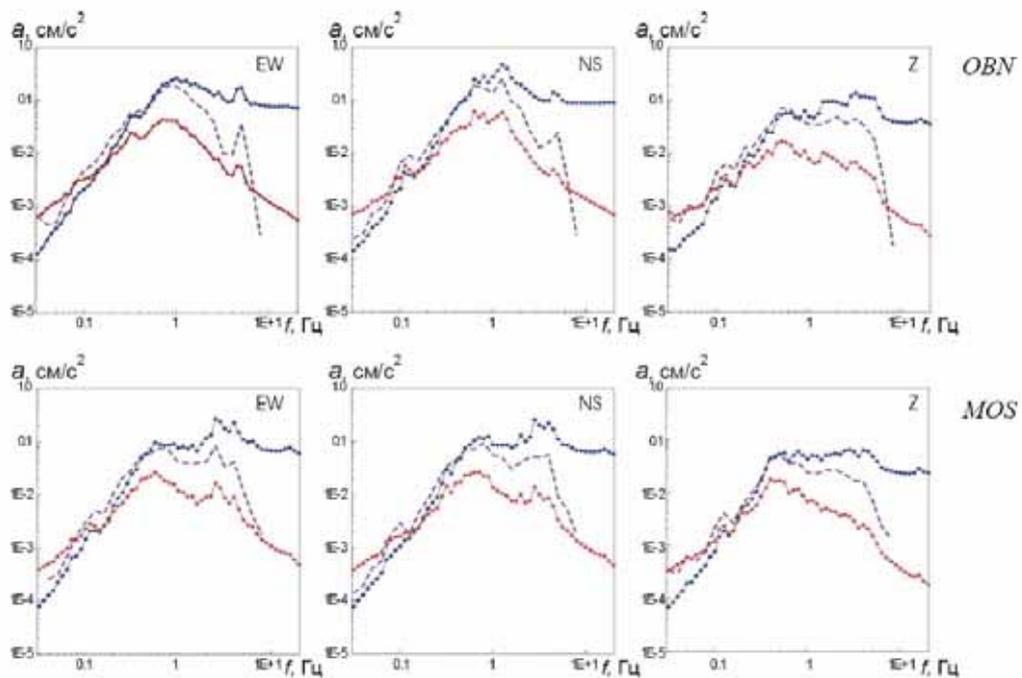


Рис. 6. Спектры Фурье (пунктирные линии) и спектры реакции псевдоскорости (красный цвет) и псевдоускорения (синий цвет) для землетрясения 27.10.2004 г., на ст. Обнинск (вверху) и ст. Москва (внизу).

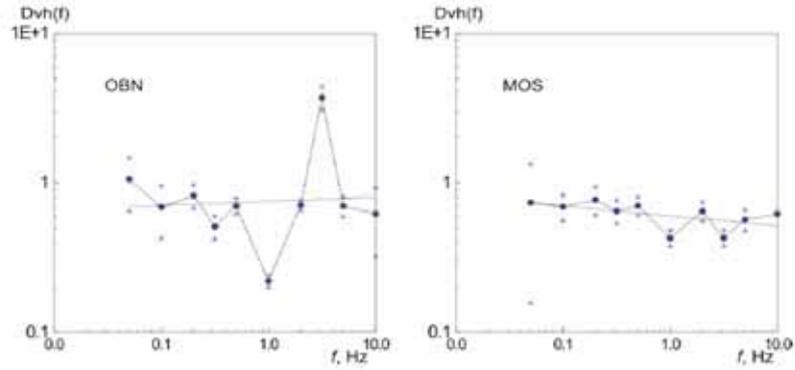


Рис. 7. Отношения спектральных амплитуд на вертикальных компонентах к спектральным амплитудам на горизонтальных компонентах на станциях Обнинск (OBN) и Москва (MOS).

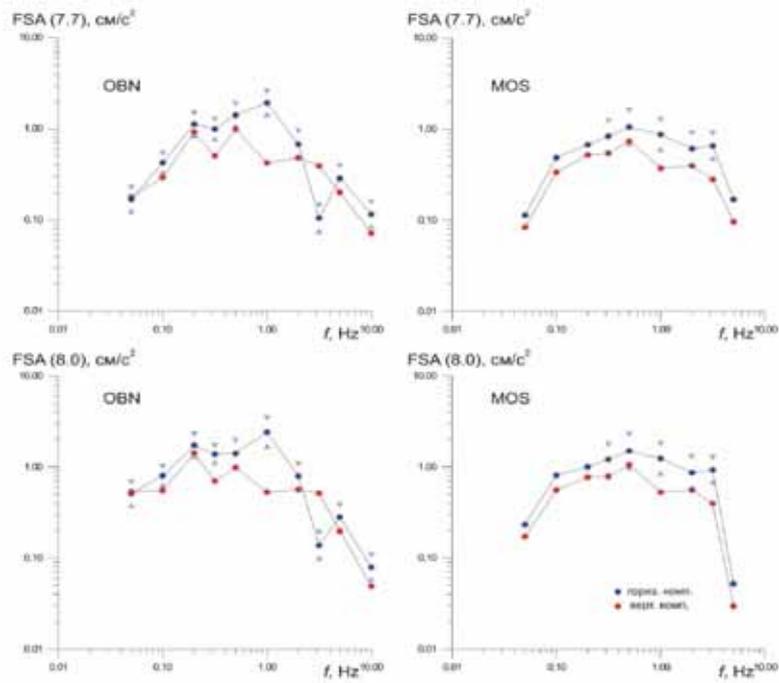


Рис. 8. Спектральные амплитуды сценарных землетрясений с $M_S = 7.7$ и $M_S = 8.0$ на станциях Обнинск (OBN) и Москва (MOS).

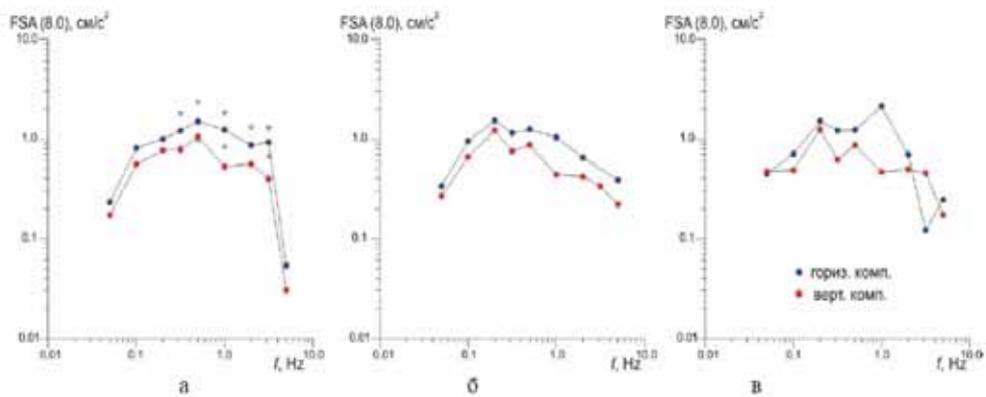


Рис. 9. Спектры сценарного землетрясения с $M_S = 8.0$ на ст. Москва.

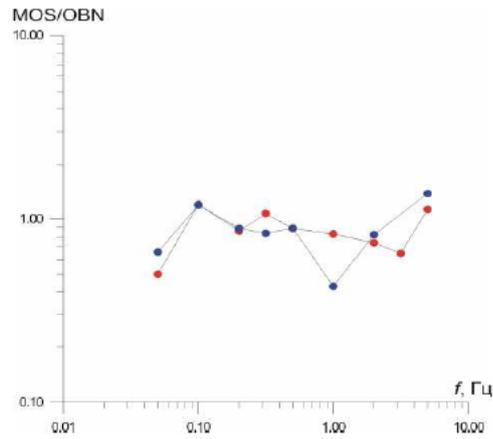


Рис. 10. Средние отношения спектральных амплитуд 9-ти землетрясений, зарегистрированных станциями Москва и Обнинск за период 1999 - 2005 гг. (синий цвет - горизонтальные компоненты, красный - вертикальные).

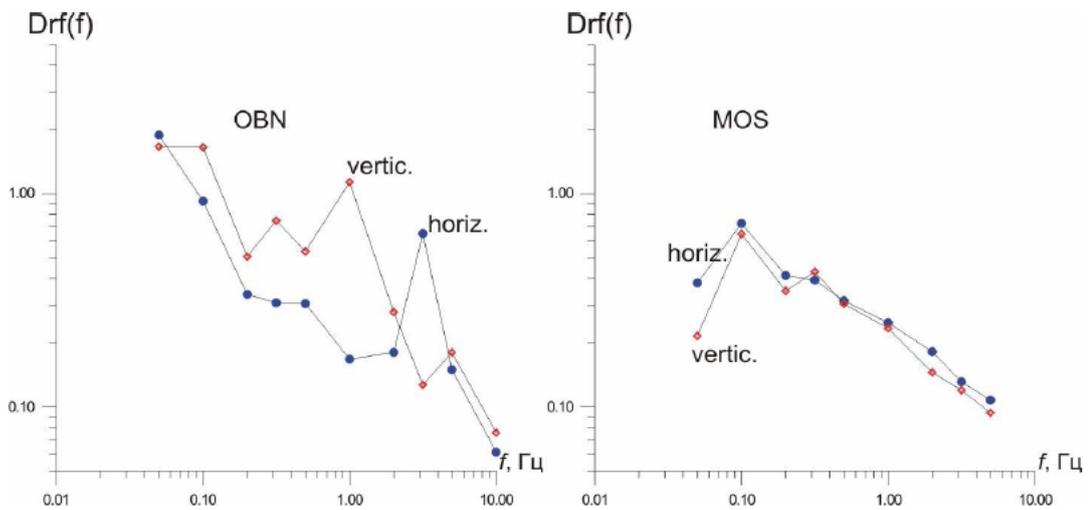


Рис. 11. Отношения $Drf(f) = PRV(f)/FSA(f)$ на ст. Обнинск (OBN) и Москва (MOS), осредненные для каждой частоты сетки анализируемых частот.

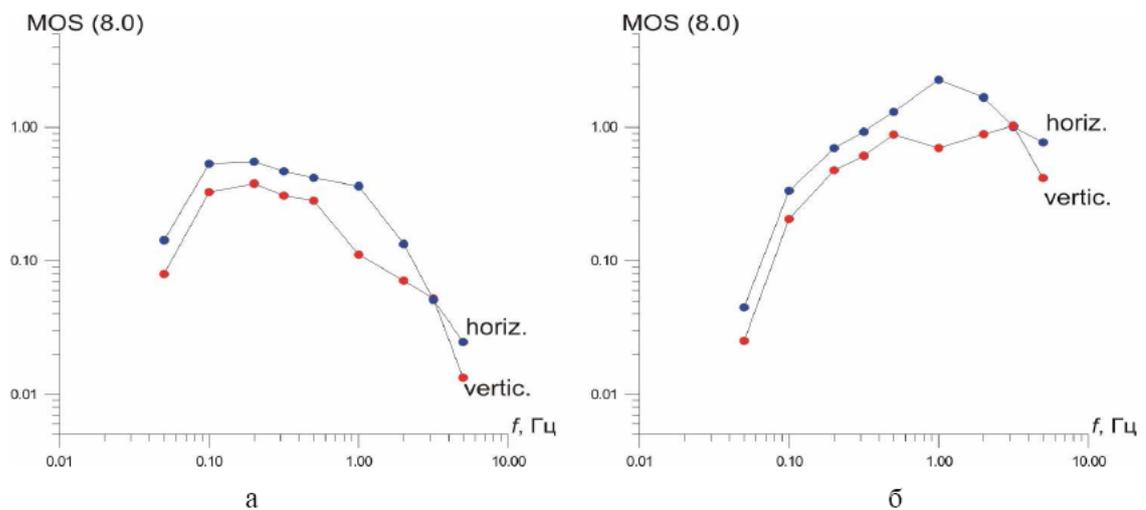


Рисунок 12 а – средний спектр реакции псевдоскорости $PRV(f)$; б – средний спектр реакции ускорения (5% затухание) на ст. Москва при сценарном землетрясении с $M_w = 8.0$.

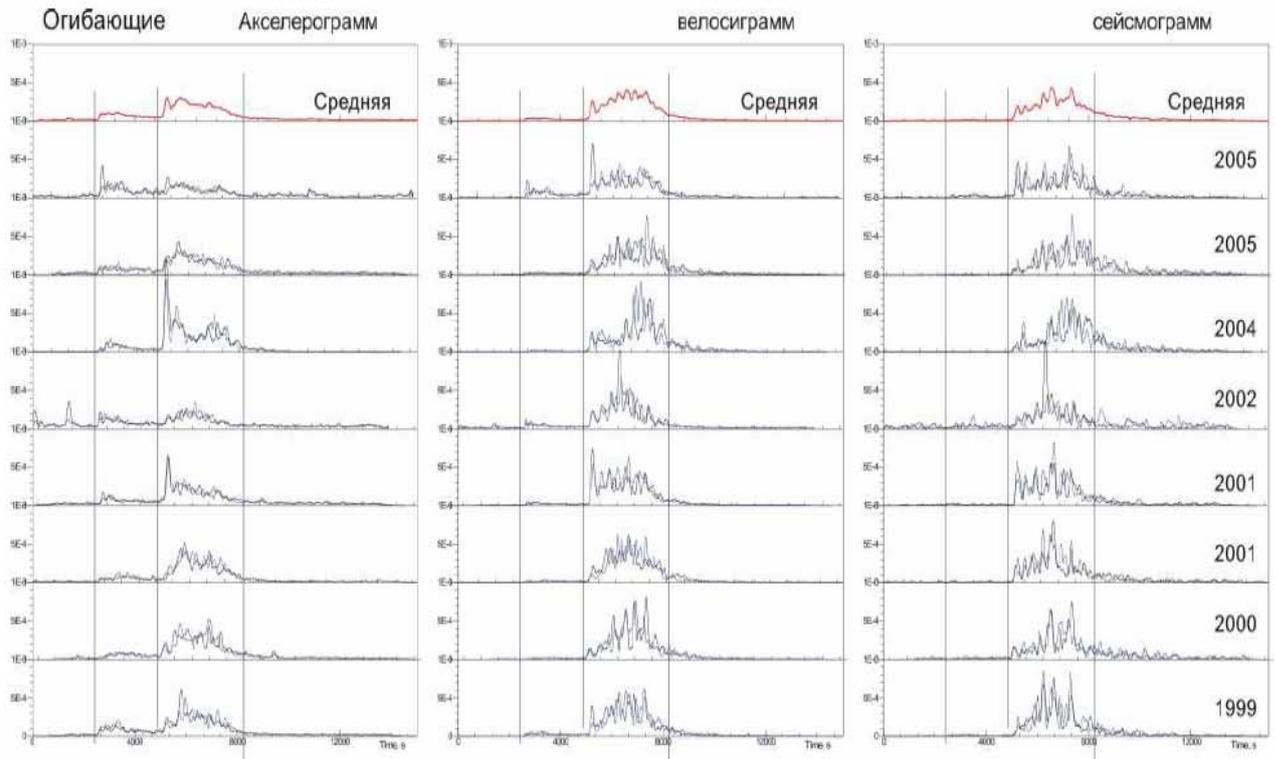


Рис. 13. Огибающие по энергии записей землетрясений зоны Вранча на ст. Москва. В верхнем ряду – средние по всем событиям. По оси абсцисс – отсчеты.

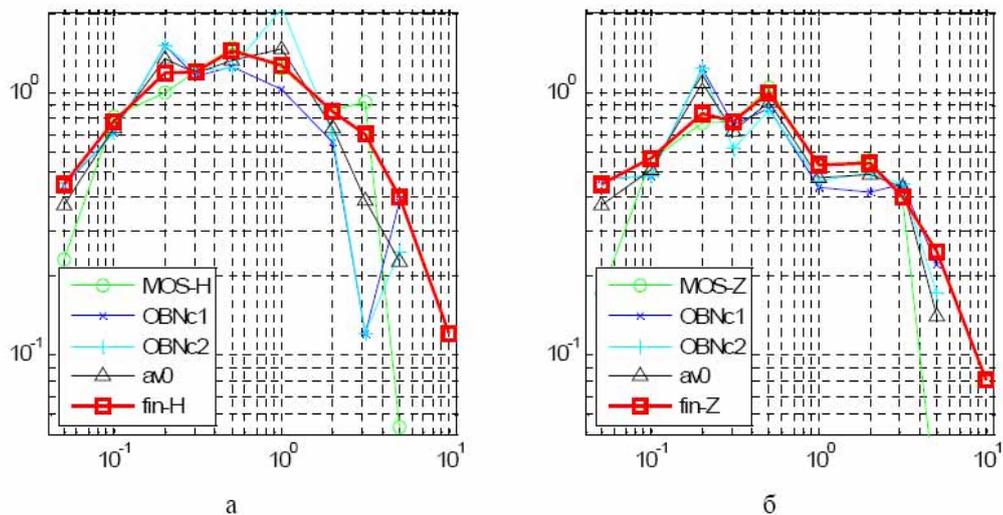


Рис. 14. Средние амплитудные спектры Фурье ускорения $FSA(f)$ для горизонтальных (а) и вертикальных (б) компонент колебаний поверхности. По вертикальной оси: спектральные амплитуды ускорения, $\text{см}/\text{с}^2$; по горизонтальной оси: частота f , Гц.

Спектры Фурье, их экстраполяция и обобщение. По записям рассчитывались сглаженные спектральные амплитуды Фурье $FSA(f)$. Спектры Фурье записей сглаживали в окне 1/3 октавы и для дальнейшего анализа оценивали для конкретных частот. Была выбрана сетка фиксированных частот: 0.05 Гц, 0.1 Гц, 0.2 Гц, 0.316 Гц, 0.5 Гц, 1 Гц, 2 Гц, 3.16 Гц, 5 Гц и 10 Гц. Для этих частот рассчитывали также спектры реакции для затухания $D=5\%$.

Сглаженные спектры далее использовали для оценки магнитудной зависимости спектров и экстраполяции к уровням магнитуд $M_w = 7.7$ и $M_w = 8.0$ (два варианта сценарных землетрясений). Расчеты проводились по данным станций Москва и Обнинск. Данные ст. Обнинск более многочисленны, и микросейсмический шум на ст. Обнинск существенно ниже, чем на ст. Москва. Поэтому контроль результатов по ст. Обнинск был принципиально необходим.

Таблица 3. Средние значения и стандартные отклонения $\sigma_{Dvh(f)}$ значений $Dvh(f)$ на станциях Обнинск и Москва.

f , Гц	Ст. Обнинск			Ст. Москва		
	$Dvh(f)$	N	$\sigma_{Dvh(f)}$	$Dvh(f)$	N	$\sigma_{Dvh(f)}$
0.05	1,056	12	0.405	0.739	9	0.872
0.1	0.687	12	0.26	0.69	9	0.194
0.2	0.822	12	0.141	0.77	9	0.236
0.316	0.508	12	0.085	0.647	9	0.168
0.5	0.699	12	0.074	0.701	9	0.137
1,0	0.219	12	0.019	0.426	9	0.07
2,0	0.710	12	0.052	0.646	9	0.13
3,16	3,735	12	0.624	0.428	9	0.069
5,0	0.699	12	0.103	0.567	9	0.129
10.0	0.619	6	0.296	0.62	1	

Таблица 4. Принятые для расчетов спектры Фурье ускорения для событий с параметрами $M_w = 8.0$, $\Delta\sigma=200$ бар (условный расчетный случай) и $M_w = 8.0$, $\Delta\sigma=325$ бар (сценарное событие, соответствующее верхнему 84% квантилю распределения разброса амплитуд)

f , Гц	$M_w=8.0$, $\Delta\sigma=200$ бар		$M_w=8.0$, $\Delta\sigma=325$ бар	
	FSA-H	FSA-Z	FSA-H	FSA-Z
0.05	0.45	0.45	0.522	0.522
0.10	0.78	0.56	0.893	0.673
0.20	1.19	0.84	1.322	0.972
0.31	1.21	0.78	1.347	0.917
0.50	1.45	1.00	1.589	1.139
1.00	1.27	0.53	1.410	0.670
2.00	0.85	0.54	0.990	0.680
3.16	0.70	0.40	0.840	0.540
5.00	*0.40	*0.25	*0.540	*0.390
10.0	×0.12	×0.08	×0.260	×0.220

Примечание. Знаком «×» помечены данные, полученные экстраполяцией спектров вдоль оси частот, их использование не рекомендуется для сколько-нибудь ответственных расчетов. Знаком «*» помечены относительно менее надежные данные. Целесообразна их перепроверка по альтернативным методикам.

Таблица 5. Бета-коэффициенты для горизонтальной компоненты колебаний поверхности на ст. Москва от сценарного землетрясения зоны Вранча: средние значения и среднеквадратичные отклонения по 25 реализациям

T, c	$f, Гц$	$\beta(T)$	$\sigma(\beta(T))$
0.100	10.0000	×1.305	0.142
0.125	7.9433	×1.592	0.200
0.158	6.3096	×1.830	0.273
0.199	5.0119	*1.971	0.267
0.251	3.9811	*2.174	0.320
0.316	3.1623	2.263	0.389
0.398	2.5119	2.187	0.342
0.501	1.9953	2.178	0.343
0.631	1.5849	2.050	0.353
0.794	1.2589	1.910	0.337
1.000	1.0000	1.789	0.357
1.258	0.7943	1.637	0.324
1.584	0.6310	1.431	0.304
1.995	0.5012	1.192	0.253
2.511	0.3981	1.023	0.235
3.162	0.3162	0.806	0.215
3.981	0.2512	0.688	0.181
5.011	0.1995	0.560	0.136
6.309	0.1585	0.409	0.089
7.943	0.1259	0.299	0.068
10.000	0.1000	0.228	0.063
12.589	0.0794	*0.163	0.057
15.848	0.0631	*0.102	0.032
19.952	0.0501	*0.0748	0.020

Примечания:

Знаком «×» в таблице помечены данные, полученные экстраполяцией спектров вдоль оси частот и не опирающиеся непосредственно на наблюдения, они имеют чисто ориентировочный смысл, и их использование не рекомендуется для сколько-нибудь ответственных расчетов.

Знаком «*» помечены относительно менее надежные данные. Целесообразна их перепроверка по альтернативным методикам.

Столбец $\sigma(\beta(T))$ характеризует степень разнообразия значений $\beta(T)$ в отдельных реализациях сигнала.

При небольшом объеме данных было целесообразно объединить данные для вертикальных и горизонтальных компонент. Считали, что систематических различий между горизонтальными компонентами нет, и что различие между вертикальной и горизонтальной компонентами устойчиво и частотно-зависимо. Для оценки этой величины для каждой частоты из указанной сетки определены величины $Dvh(f)$, равные отношению спектральных амплитуд $FSA(f)$, определенных для вертикальных компонент записей к спектральным амплитудам, определенным для горизонтальных компонент тех же записей (брались средние по двум горизонтальным компонентам). Эти величины показаны на Рис. 7 с доверительными интервалами для средних, равными двум стандартным ошибкам среднего в логарифмической шкале. Стандартные отклонения здесь и далее рассчитывались как квадратные корни из сумм квадратов отклонений от средних, деленные на $(N-1)$, где N – число усредняемых значений. При этом стандартная ошибка оценки среднего принималась равной стандартному отклонению, деленному $N^{0.5}$.

Прямое осреднение спектральных амплитуд $FSA(f)$, относящихся к различным значениям магнитуды, невозможно. Поэтому обобщение спектральных характеристик #индивидуальных землетрясений велось после их экстраполяции к $M_w = 7.7$ и 8.0 . При этом зависимость спектра от магнитуды строилась на основе принятой в очаговой сейсмологии теоретических моделей $FSA(f, M_w)$ (см раздел. 1). Поясним, что в принципе зависимость спектра от магнитуды можно было определять путем нахождения эмпирического тренда $FSA(M_w|f)$ непосредственно по наблюдательным данным. Однако ожидаемые ошибки экстраполяции по подобному эмпирическому тренду в наших условиях настолько велики, что делают получение сколь-нибудь надежного результата нереальным.

Теоретические спектральные тренды для набора частот были получены на основе известной спектральной модели Бруна [Brune, 1970]. Предварительно были опробованы и другие спектральные семейства, и было установлено, что результат экстраполяции, в определенных пределах, слабо зависит от выбора модели. Важное значение имеет выбор параметра $\Delta\sigma$ - сброшенного напряжения в модели Бруна. Как показано выше, для землетрясений Вранча непригодны спектральные модели с единым значением $\Delta\sigma$ для широкого диапазона магнитуд. В диапазоне магнитуд $M_w = 4-6,7$ следует брать значение $\Delta\sigma = 30$ бар (типичное для коровых землетрясений); тогда как в диапазоне магнитуд $M_w = 6,8-7,5$ (и предположительно выше) спектры описываются существенно более высоким значением сброшенного напряжения, близким к $\Delta\sigma = 200$ бар, и типичным для очагов промежуточной глубины.

Поэтому экстраполяция велась в два шага. Сначала гипотетические спектральные амплитуды сценарных землетрясений рассчитывались в предположении $\Delta\sigma = 30$ бар. Для этого было рассчитано семейство очаговых спектров (спектров скорости изменения сейсмического момента) $M(f, M_w)$ для $\Delta\sigma = 30$ бар; эта функция компактно обозначается $S_{30}(M_w|f)$. С помощью таблицы $lg(S_{30}(M_w|f))$ для каждой частоты f выполнен пересчет наблюдений на горизонтальных компонентах к $M_w = 7.7$ и $M_w = 8.0$. Таким образом, было получено несколько оценок спектральных амплитуд сценарных землетрясений (с магнитудами 7.7 и 8.0), по которым определены средние значения и стандартные отклонения. После осреднения внесена поправка в средние на различия между значениями сброшенного напряжения для землетрясений с низкой ($\Delta\sigma = 30$ бар) и высокой магнитудой ($\Delta\sigma = 200$ бар). Для этого использована соответствующая таблица $lg(S_{200}(M_w|f))$, аналогичная предыдущей. Поправки рассчитывались как разности $lg(S_{200}(M_w|f)) - lg(S_{30}(M_w|f))$ при фиксированных значениях $M_w = 7.7$ и 8.0 .

Далее оценивались спектральные амплитуды сценарных землетрясений на вертикальных компонентах. Для этого найденные спектральные амплитуды на горизонтальных компонентах умножались на предварительно определенные отношения $Dvh(f)$ (рис. 7) для каждой частоты. Результаты представлены на рис. 8, с доверительными интервалами, равными двум стандартным ошибкам.

Для объединения данных по ст. Москва и Обнинск предварительно определяли средние спектральные поправки. Средние значения отношений спектральных амплитуд сценарных

землетрясений на станции Москва к аналогичным величинам на станции Обнинск для двух сценарных землетрясений с магнитудами 7.7 и 8.0 составляют ~ 0.85 для $M_w = 7.7$ (0.851 ± 0.11 для горизонтальных и 0.844 ± 0.08 для вертикальных компонент) и ~ 0.91 для $M_w = 8.0$ (0.907 ± 0.14 для горизонтальных компонент и 0.908 ± 0.10 для вертикальных).

Изучали также частотный диапазон надежных оценок спектров. Вообще, записи землетрясений на ст. Москва показывают высокий уровень антропогенного сейсмического шума относительно уровня полезного сигнала - сейсмических волн. Для определения частотного состава сейсмических шумов были построены спектры шума (участков записей перед вступлениями P - волн). В этих спектрах преобладают частоты океанических микросейсм (0.1 - 0.3 Гц) и техногенных помех 3 - 6 Гц; на частотах ниже 0.3 Гц и выше 3.5 Гц спектральные амплитуды сигнала и шума для многих из записей близки. Поэтому на частотах 0.05 - 0.3 Гц (в диапазоне частот океанических микросейсм), а также на частотах 3.5 - 5 Гц (в диапазоне частот городских техногенных шумов) спектральные амплитуды сценарных землетрясений оценивались только на основе спектров наиболее сильного зарегистрированного землетрясения 2004 г. с магнитудой $M_w = 5.9$ (рис. 8).

На рис. 9 представлены варианты оценок спектра землетрясения с $M_w = 8,0$ на ст. Москва: (а) – средние, рассчитанные по записям 9-ти землетрясений, зарегистрированных ст. Москва, параметры которых приведены в Таблице 2; (б) – рассчитанные для ст. Москва по спектрам, полученным для этого землетрясения на ст. Обнинск, введением частотно-зависимых поправок, оцененных по 9-ти землетрясениям, зарегистрированным как на ст. Обнинск, так и на ст. Москва (сами эти поправки приведены на рис. 10); (в) - рассчитанные по спектрам, полученным для этого землетрясения на ст. Обнинск, с постоянной поправкой (0.879), рассчитанной как средняя поправка по всем частотам и по горизонтальным и вертикальным компонентам. Средний спектр экстраполированного землетрясения с $M_w = 8.0$ на ст. Москва, рассчитан как средний из трех спектров, приведенных на рис. 9, он описан ниже (Рис. 14).

Спектр реакции экстраполированного землетрясения с $M_w = 8.0$ на ст. Москва был оценен на основе спектра Фурье. По всем имеющимся записям землетрясений на ст. Москва рассчитаны отношения спектральных амплитуд спектров реакции псевдоскорости к спектральным Фурье – амплитудам: $Drf(f) = PRV(f)/FSA(f)$. Эти отношения были осреднены для каждой частоты нашей сетки для горизонтальных и вертикальных компонент; результаты представлены на Рисунке 11. Проверено, что эти отношения не зависят от магнитуды.

На рис. 12 показаны: а – средний спектр реакции псевдоскорости $PRV(f)$ на ст. Москва при экстраполированном землетрясении с $M_w = 8,0$, полученный умножением рассчитанного ранее среднего спектра Фурье на средние отношения $Drf(f)$; б – средний спектр реакции (с 5% затуханием) ускорения $RAA(f) \approx PRA(f) = 2 \cdot \pi \cdot PRV(f)$ на ст. Москва при экстраполированном землетрясении с $M_w = 8.0$.

Длительность колебаний и форма огибающих. Для моделирования акселерограмм было необходимо изучить длительность и форму огибающих колебаний. В Таблице 2, даны оценки длительности d_{50} по Аптикаеву - как продолжительность колебаний, превышающих по амплитуде уровень 50% от пикового значения. Видно, что разброс, очень велик. Оценки длительности могут заметно различаться даже для двух горизонтальных компонент записи одного землетрясения и определяются соотношениями интенсивностей групп P - и S -волн.

Применили и другой способ оценки длительности – как длины окна содержащего 80% выделившейся энергии колебаний. Этот метод дает существенно более стабильные оценки. Легко видеть заметные различия между характеристиками колебаний, связанные с различием формы огибающих записей на ст. Обнинск и ст. Москва. Для Обнинска длительность колебаний на горизонтальных компонентах (105 - 142 с) вдвое меньше чем на вертикальных (213 - 291 с), что связано с интенсивными группами S -волн, регистрируемыми на горизонтальных компонентах. На записях ст. Москва S -волны выражены относительно слабее, и оценки длительности (по энергетическим характеристикам) на горизонтальных и вертикальных компонентах близки.

На Рисунке 13 представлены огибающие (по энергии) горизонтальных компонент акселерограмм, велосиграм и сейсмограмм землетрясений зоны Вранча, зарегистрированных ст. Москва. Рассчитанные огибающие были сглажены в окне 7,5 сек и нормализованы; в верхнем ряду показаны средние по всем событиям огибающие.

Первый вариант спектров Фурье, принятый для сценарного землетрясения. На основе выполненного анализа записей землетрясений, зарегистрированных станциями Москва и Обнинск, были рассчитаны спектры Фурье и спектры реакции сценарного землетрясения, а далее на этой основе в учетом длительности - акселерограммы сценарных землетрясений на ст. Москва.

На рис. 14 отражены шаги получения принятого спектра. Во-первых, приведены три варианта среднего экстраполированного амплитудного спектра Фурье ускорения $FSA(f)$ для горизонтальных и вертикальных компонент колебаний грунта ст. Москва (MOS) (рис. 9), полученные в результате приведения наблюдаемых спектров к стандартным условиям: $M_w = 8.0$, $\Delta\sigma = 200$ бар. Варианты построены: (а) по данным регистрации на ст. Москва (MOS) (б) по данным регистрации на ст. Обнинск, с пересчетом к условиям ст. Москва путем введения частотно-зависимых поправок (OBNc1) и (в) по данным регистрации на ст. Обнинск, с пересчетом к условиям ст. Москва путем введения постоянной поправки в виде коэффициента 0.879 (OBNc2). (Эта последняя цифра отражает в основном небольшое снижение амплитуд за счет роста расстояния от очаговой зоны от ст. Обнинск к ст. Москва). Кривая “av0” получена осреднением трех названных кривых. Кривая “fip” – принятая в дальнейших расчетах форма спектра, при определении которой были учтены степень относительной погрешности и ожидаемые неточности исходных кривых. Она далее принималась как задающая медиану или 50% квантиль для вариаций спектров индивидуальных событий Вранча с $M_w = 8.0$.

Полученные спектры сведены в таблицу 4 (колонки 2 и 3). В колонках 4 и 5 даны спектры, принятые для расчетов сценарного землетрясения; они соответствуют выбору $M_w = 8.0$, $\Delta\sigma = 325$ бар (сценарное событие, соответствующее верхнему 84% квантилю распределения разброса амплитуд в предположении $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$). «Типичное» событие, отвечающее 50% квантилю, имеет $\Delta\sigma = 144$ бар.

3. Описание алгоритма расчета модельных движений грунта и выполнение расчетов для первого варианта сценарного события

На основе рассчитанных спектров Фурье сценарного землетрясения, и с учетом длительности колебаний строились акселерограммы сценарных землетрясений на ст. Москва. Опишем кратко методику расчета модельных движений грунта от сценарного землетрясения для условий ст. Москва. Модельные движения – это реализации нестационарного случайного процесса, или случайные сигналы. Принятый алгоритм их синтеза и контроля корректности включает следующие логические шаги:

- построение случайной огибающей с реалистической длительностью, средней формой и разбросом формы индивидуальной огибающей относительно средней формы
- генерация белого шума с единичным амплитудным спектром и модуляция этого шума огибающей с сохранением уровня спектра
- создание фильтра для синтеза корректного спектра сигнала ускорения путем фильтрации ранее полученного нестационарного почти белого шума; фильтр использует заранее созданный амплитудный спектр Фурье ускорения $FSA(f)$ для сценарного события
- фильтрация, наложение условий нулевого смещения, скорости и ускорения в начале и конце сигнала
- оценка спектра сигнала и проверка на согласие с входным спектром
- расчет спектра реакции по скорости $PSV(f)$ и ускорению $PSA(f)$

- расчет безразмерного отношения $Drf(f)=PSV(f)/FSA(f)$ и проверка согласия со средним отношением $Drf(f)$ для наблюдаемых, реальных записей.
- расчет максимальных/пиковых значений ускорения, скорости и смещения $a_{max}, v_{max}, d_{max}$
- расчет бета-коэффициентов $\beta(f)=2\pi f * PSV(f)/a_{max}$

Все этапы расчета выполняются сразу для серии модельных записей (в типичном случае – 25-50 реализаций), что позволяет получать достаточно устойчивые оценки для средних и стандартных отклонений. Все расчеты проводились только для горизонтальной компоненты движения грунта. Описанные этапы расчета проиллюстрируем графиками.

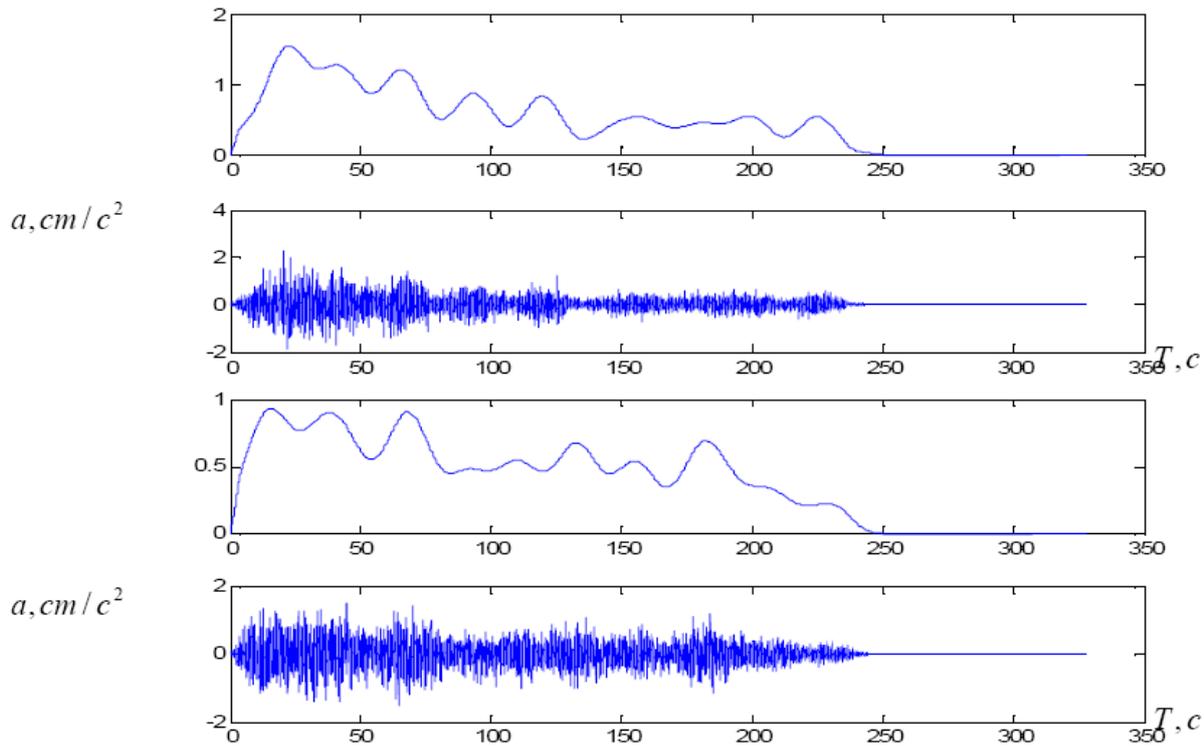


Рис. 15. Модельные огибающие и соответствующие синтетические акселерограммы.

На рисунке 15 приведены два примера модельных огибающих и соответствующие сигналы ускорения. Длительность основной части сигнала – около 160 с, в соответствии с поведением реальных записей группы *S* и поверхностных волн (рис. 13).

На рисунке 16 приведены по две реализации сигналов ускорения, скорости и смещения.

На рисунке 17 приведены пары спектров Фурье: целевой спектр (т.е. принятый спектр Фурье для сценарного землетрясения – согласно Таблице 4) (кружки) и сглаженные спектры: слева – для отдельной реализации (искусственной акселерограммы), справа – средний по 25 реализациям. Как видно из рисунков, согласие вполне приемлемое.

На рисунке 18 приведены отношения $Drf(f)$, средние по 25 реализациям, и соответствующие оценки по записям землетрясений средних магнитуд. Квадраты – данные ст. Москва, кружки – данные ст. Обнинск. На частотах выше 0.2 Гц модельная зависимость проходит чуть выше средней наблюдаемой для MOS, но ниже средней наблюдаемой для OBN, на более низких частотах невязки имеют менее четкий характер, но в целом колеблются около нуля. Согласие признано приемлемым.

В табл. 6 приведены варианты значений модельного максимального ускорения A , скорости V и смещения D для горизонтальной компоненты колебаний поверхности на ст. Москва от сценарного землетрясения зоны Вранча. Основной расчет вели для случая $P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$ (Случай 1). Разброс оценок для индивидуальных реализаций (модельных трасс) составляет около 16% как для A , так и V , и около 20% для D . Точность моделирования самих

оценок в $25^{0.5}=5$ раз выше, около 3%. Оценки даны также путем пересчета для случая медианы, полученной как результат экстраполяции (Случай 2, $P=50\%$) а также для комбинации $P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.30$, (Случай 3).

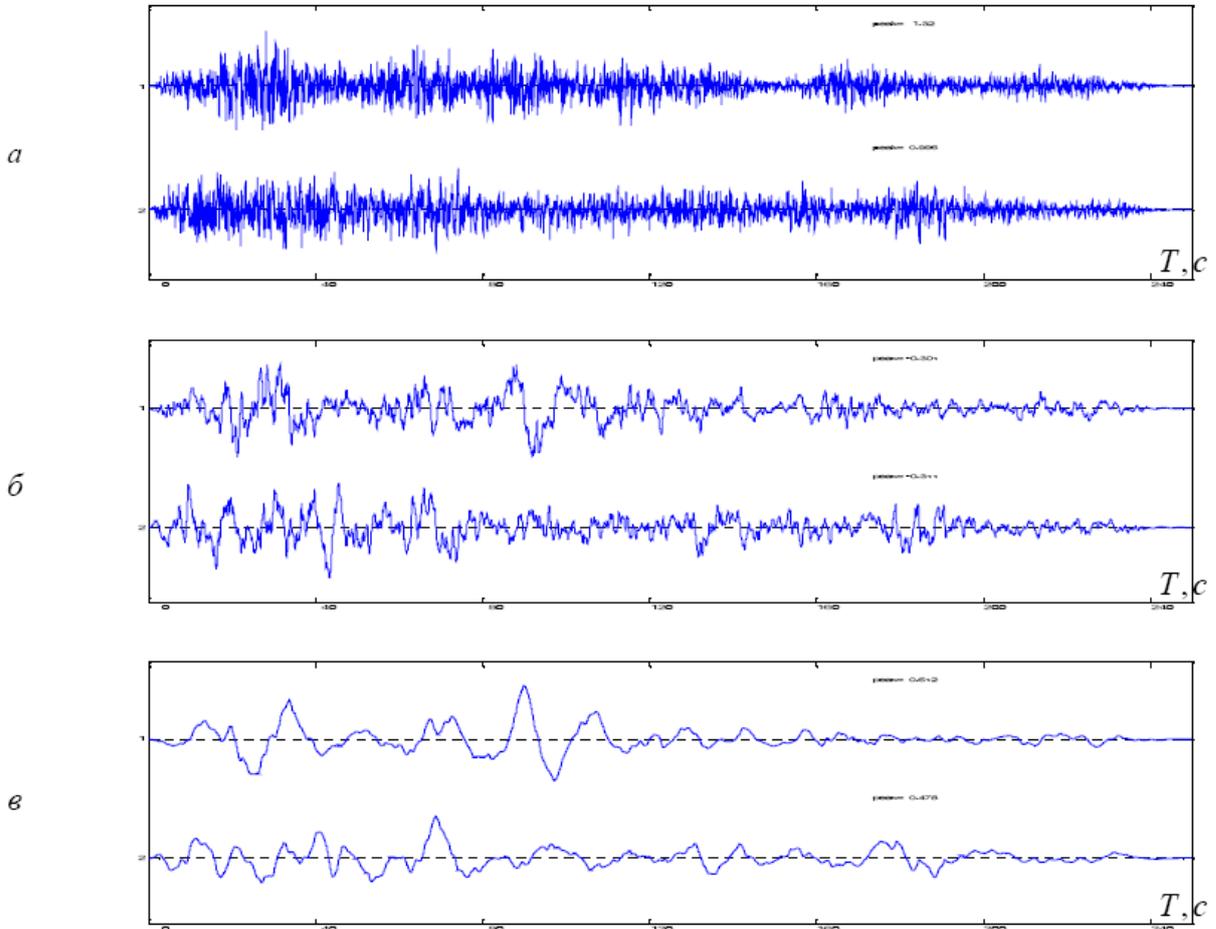


Рис. 16. Две реализации сигналов ускорения (а), скорости (б) и смещения (в). Амплитуды – в относительных единицах, значения максимумов указаны в подписи.

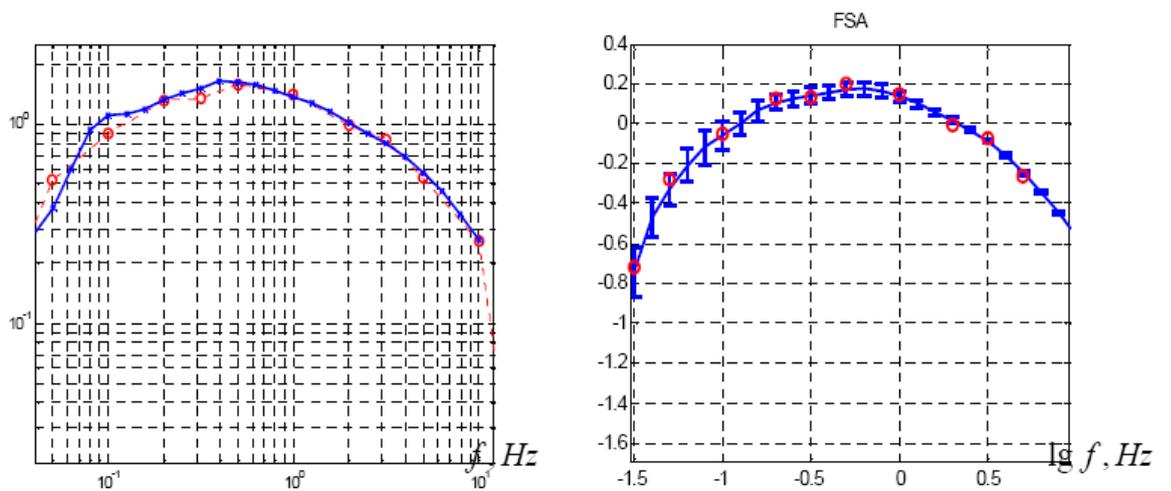


Рис. 17. Спектры Фурье: слева - полученный по отдельной реализации; справа – полученный по 25 реализациям. Красные кружки – целевой спектр.

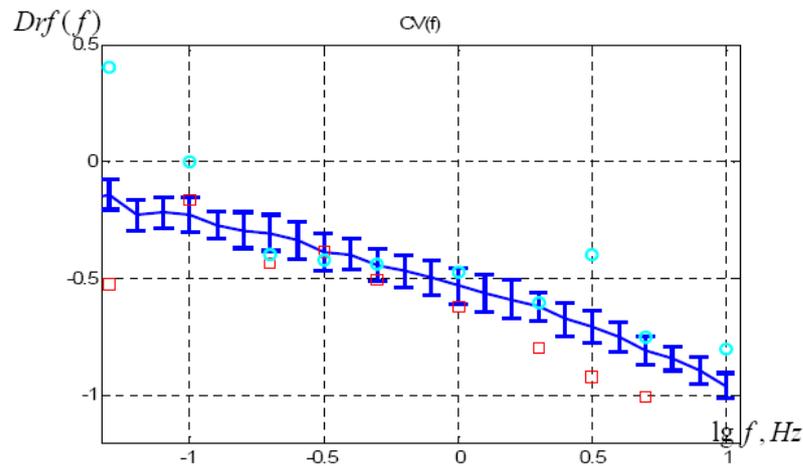


Рис. 18. Средние отношения $Drf(f)$ (синяя линия). Красные квадраты – оценки $Drf(f)$ по записям ст. Москва, голубые кружки – оценки $Drf(f)$ по записям ст. Обнинск.

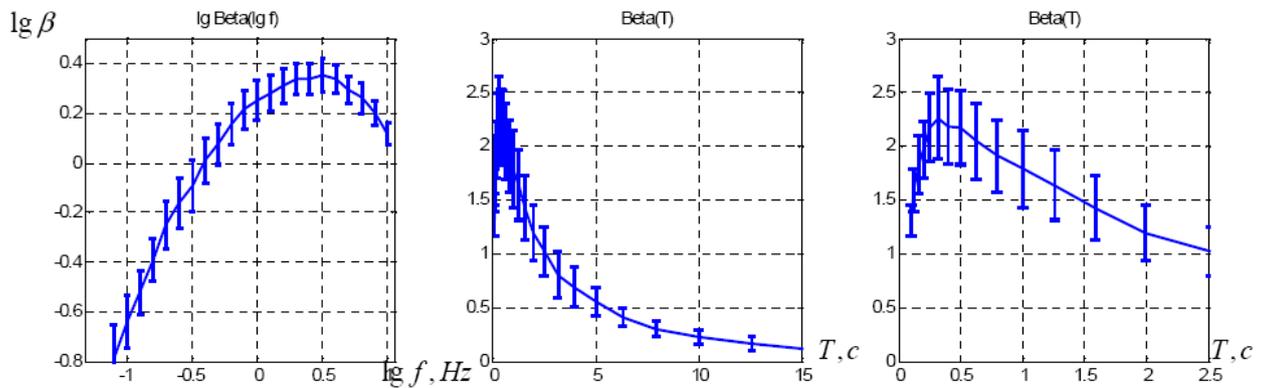


Рис. 19. Результирующие бета-коэффициенты.

A , V и D характеризуют максимальные ускорения, максимальные скорости и максимальные смещения. Значения A и V имеют объективный характер; значения D имеют в основном ориентировочный смысл, так как они в существенной степени определяются выбранным положением среза (в области низких частот) спектра смещения грунта и крутизной этого среза. (Напомним, что введение среза диктуется большим уровнем микросейсм на низких частотах).

На рисунке 19 приведены результирующие бета-коэффициенты в логарифмической и натуральной шкалах. В Таблице 5 приведены те же данные в числовой форме. Данный вариант бета-коэффициентов принят как окончательный.

4. Контроль и коррекция результатов экстраполяционных расчетов на основании наблюдений сильных землетрясений зоны Вранча на ст. Москва; описание результатов моделирования

Следует сопоставить полученные цифры с наблюдениями ст. Москва для сильных толчков зоны Вранча 1977 г. и 1986 г. из Отчета «Оценка возможных сейсмических воздействий на территории г. Москвы...» по Договору ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и ИФЗ РАН. Очевидно, что ускорения нельзя достоверно оценить по этим аналоговым записям, т.к. высокочастотные компоненты колебаний утеряны, а максимальные скорости и смещения на вертикальных компонентах следующие:

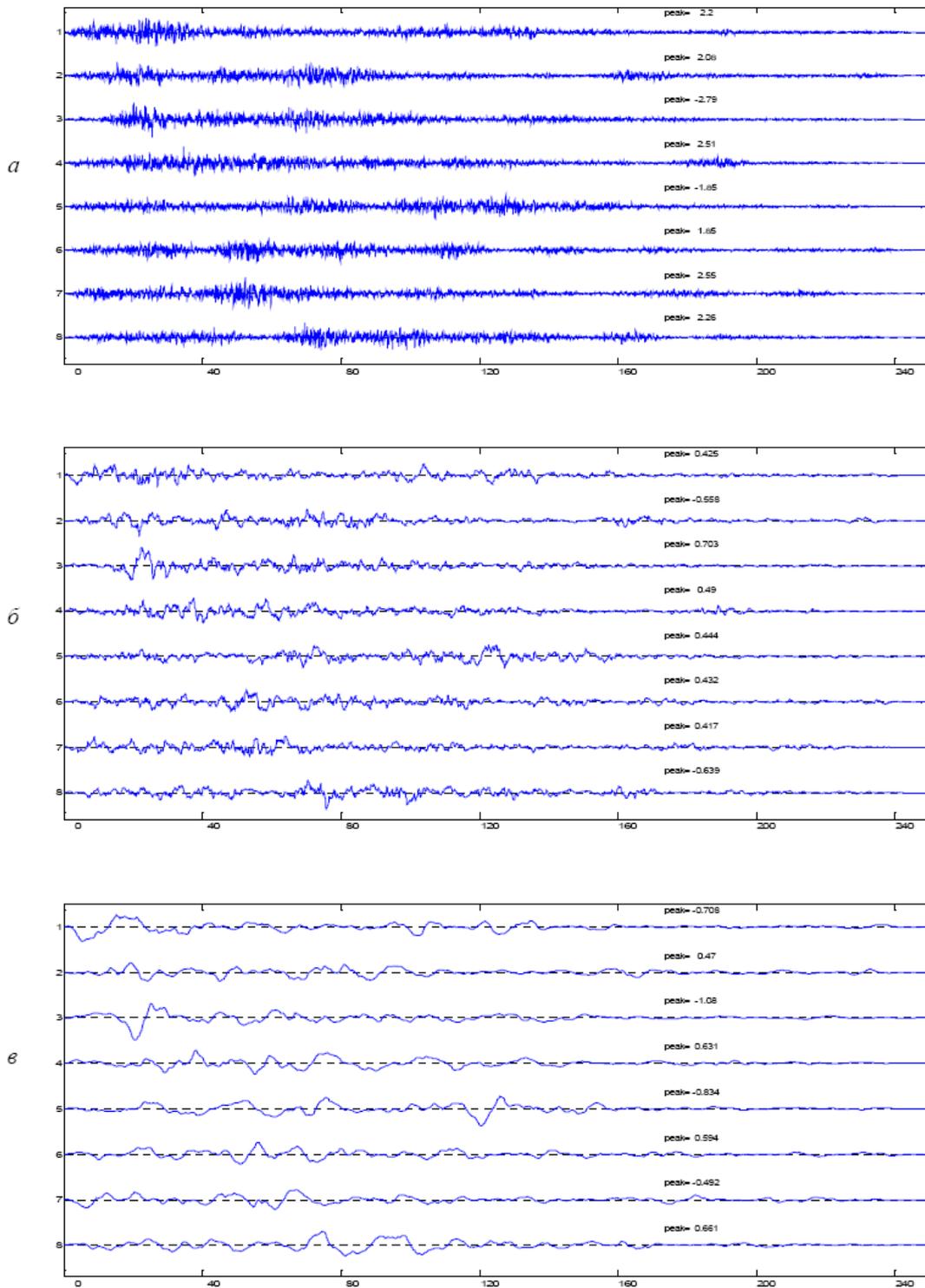


Рис. 20. Примеры рассчитанных сигналов ускорения (а), скорости (б) и смещения (в) при сценарном землетрясении.

Событие 1977 г., $M_w = 7.4$: $V=0.053$ см/с, $D=0.017$ см
 Событие 1986 г., $M_w = 7.1$: $V=0.075$ см/с, $D=0.044$ см

По-видимому, при цифровой обработке оцифрованных аналоговых записей нижний срез рабочей полосы был выбран ощутимо выше, чем в нашей модели, поэтому смещения плохо сопоставимы. Осредненная оценка по наблюдениям максимальной скорости V для вертикального канала для событий 1977 и 1986 гг. составляет около 0.065 см/с. Для горизонтального канала она должна была быть примерно в 1.5 раз выше (как видно из обработки реальных данных - Таблицы 3 и рис. 7), и составлять около 0.1 см/с.

Пересчитаем эту цифру к случаю: $M_{\max} = 8.0$, типичное событие (медианное, $P=50\%$). Коэффициент связи $d \lg(V)/dM$ составляет обычно около 0.6, поэтому при различии магнитуд примерно на 0.75, различие значений V должно составить около $10^{0.6 \cdot 0.75} \approx 3$ раза, и таким образом, ожидаемое значение V близко к 0.3 см/с для типичного (медианного) события с $M_w=8.0$. Фактически полученная выше оценка для 50% события составляет 0.19 см/с. Согласие по порядку величины имеется, но полученная путем экстраполяции оценка ниже полученной по наблюдениям примерно в 1.5 раза.

Подобное расхождение сочтено достаточно серьезным. Несмотря на малое число зарегистрированных сильных событий – всего два – они дают непосредственную информацию о свойствах колебаний при других подобных событиях. Такая информация заведомо надежнее результатов экстраполяции. По этой причине принято решение применить к результатам экстраполяции повышающий коэффициент $K=1.5$. Соответственно должны быть увеличены средние значения A , V и спектров реакции. Сопоставление амплитуд для этого и других вариантов сценарного события будет проведено особо в разделе 7. Таблица бета-коэффициентов в коррекции не нуждается. Значения D далее не обсуждаются, так как они не имеют самостоятельной объективной ценности, поскольку их численные значения зависят от произвола в выборе частоты левого среза рабочей полосы частот.

Следует обсудить возможные причины обнаруженного расхождения для амплитуд скорости. Они могут заключаться в дефектах методики экстраполяции, которые неизбежно имеют место. В первую очередь, следует отметить использование спектральной модели Аки-Бруна, которая, как уже давно стало ясно на материалах ряда детально изученных регионов, является существенно переупрощенной. Однако, уровень изученности спектров очагов зоны Вранча недостаточен для уточнения спектральной модели. Не менее вероятно, однако, что обнаруженное расхождение отражает реальное явление природы. Наиболее простая схема появления расхождений следующая. Известно, что степень упорядоченности ориентировок тензоров момента (или, что то же самое, нодальных плоскостей или «механизмов очага») с ростом магнитуды существенно увеличивается. Во многих сейсмологических ситуациях (очаговых зонах) тензоры моментов очагов с $M_w = 4-6$ имеют почти случайные ориентировки, в то время как сильные события, с $M_w = 7-7.5$ и более, ориентированы вполне упорядоченным образом. Если это имеет место для зоны Вранча, то вполне вероятно попадание ст. Москва в устойчивый максимум диаграммы направленности излучения из очага каждого сильного землетрясения, в то время как эффект направленности слабых очагов нивелируется за счет их случайной ориентировки. Различие амплитуд в 1.5 раза вполне может объясняться подобным эффектом.

На рисунке 20 приведено, сверху вниз, по 8 примеров сигналов ускорения, скорости и смещения, согласно «Второму варианту» моделирования сценарного землетрясения ($\sigma(\lg A_{HF})=0.24$, поправочный коэффициент 1.5).

Пояснения к цифровым акселерограммам. О пространственных движениях. Материалы, проиллюстрированные на рис 20- это модельные движения грунта для использования при имитации нагрузок на сооружения. Они представляют собой серию реализаций смоделированного нестационарного случайного процесса ускорения грунта. Шаг по времени 0.05 с, единицы см/с², каждая трасса длиной 800 с или 16000 отсчетов. Настоятельно не

рекомендуется масштабировать трассы к единому фиксированному значению среднего максимального ускорения, т. к. разброс индивидуальных значений максимального ускорения отражает природное разнообразие трасс при фиксированных параметрах источника и пути распространения энергии колебаний.

По тройкам статистически независимых трасс типа рис 20 можно построить рабочую модель трехкомпонентного движения грунта. Определенная грубость модели неизбежна и связана с тем, что структура случайных трехмерных векторов сейсмического движения грунта на удаленностях 1000-1500 км от источника не изучена и требует специальных исследований. Пока можно исходить из следующих простых предположений. Можно ожидать, что зависимость амплитуд колебаний поверхности от азимута (поляризация) выражена не резко, и в первом приближении можно принять, что амплитудная направленность отсутствует. В рамках такого предположения пары трасс могут быть использованы как независимые ортогональные компоненты колебаний в горизонтальной плоскости. Предположение о независимости - неточное, реальная степень зависимости компонент зависит от частоты и, во всяком случае, невелика на высоких частотах. Подобным же образом и на том же уровне грубости приближения тройки трасс могут быть использованы как независимые ортогональные компоненты движения в пространстве. Амплитуды движения по вертикали будут при этом моделироваться с некоторым запасом, зависящим от частоты. Для периодов более 3 с (частот ниже 0.3 Гц) амплитуды вертикальных колебаний приближаются к амплитудам горизонтальных колебаний, так что высказанные рекомендации заведомо приемлемы. В частности, они подходят для сооружений высотой более 100 м, для которых типичные собственные периоды основного тона колебаний превышают 3 с.

5. Расчетные тренды максимальных ускорений и скоростей в функции магнитуды

По описанной выше методике нетрудно промоделировать акселерограммы и велосиграны не только для сильнейших землетрясений, но и для широкого диапазона магнитуд. По этим данным можно построить зависимость амплитуд от магнитуды и сравнить с наблюдениями подобного рода. Фактически были промоделированы группы по 25 событий с шагом 0.25 по магнитуде. На Рис. 21 представлены средние модельные пиковые горизонтальные ускорения a_{\max} (слева) и скорости v_{\max} (справа) для движений грунта от Вранчских очагов в Москве (на ст. Москва) в зависимости от магнитуды M_w .

По данным рис. 21 видно, что контрольный расчет по описанной выше методике дает вполне правдоподобную оценку наблюдаемых на ст. Москва максимальных ускорений (слева) и скоростей (справа) от толчков Вранча. Однако точка для события 2004 г. (видна при $M_w=5.8$) заметно отскакивает вверх, что говорит о аномальности этого события. В целом согласие вполне приемлемое как в плане формы тренда, так и в плане абсолютных значений.

На графике для скоростей (слева) также отображены данные о телесеизмических амплитудах P -волн землетрясений Вранча. (см табл. 8). Приводятся значения так называемой «магнитуды m_b », осредненные по многим сейсмическим станциям мира (сеть США) в диапазоне эпицентральных расстояний 20-100°. Значения m_b – это значения логарифма максимальной амплитуды скорости в P -волнах, приведенные к фиксированному эпицентральному расстоянию и глубине. Хотя интересующее нас расстояние 14° - вне использованного диапазона расстояний, можно тем не менее ожидать, что форма кривой среднемирового, по сотням и тысячам событий, тренда $m_b(M_w)$ будет близка к кривой тренда максимальной скорости для Москвы.

Этот тренд в двух вариантах - сплошная линия и пунктир - приведен на Рис. 21. Там же квадратами даны значения m_b в зависимости от M_w для индивидуальных землетрясений, для тех же событий что и данные ст. Москва, включая события 1977 г., 1986 г., 1990.05.30 и 1990.05.31. (На Рис. 21 даны значения m_b-9 ; смещение -9 сделано для удобства сопоставления графиков.) Видно, что квадраты, в общем хорошо ложатся на ожидаемую линию для данных США. При $M_w = 7-7.5$ они несколько ушли вниз от сплошной линии. Это не должно удивлять,

так как значения mb для сильнейших событий могут быть занижены - за счет иногда возникающих систематических ошибок методики сети США.

По данным, сведенным на рис. 21 б, можно сделать следующие выводы:

(1) расчет ожидаемых трендов ускорения $a_{max}(M_w)$ и скорости $v_{max}(M_w)$ по описанной выше методике дает вполне правдоподобную оценку наблюдаемых на ст. Москва максимальных ускорений и скоростей от толчков Вранча, как в плане формы кривой тренда, так и в плане абсолютных значений.

(2) Тренд $mb(M_w)$, полученный при осреднении данных максимальных скоростей Р волн по миру в целом, не расходится с небольшим числом индивидуальных данных (mb, M_w) для очагов зоны Вранча, по крайней мере при $M_w < 7$, когда данная проверка определенно корректна.

(3) Форма кривой тренда $mb(M_w)$ находится в приемлемом согласии с полученной выше расчетом зависимостью максимальной скорости волн землетрясений Вранча на ст. Москва от магнитуды.

(4) С учетом пп.1-3, есть основания полагать, что примененные методы экстраполяционного расчета велосигграмм и значений V_{max} достаточно надежны. Можно думать, что и способ пересчета A_{max} к сильным землетрясениям от слабых путем экстраполяционного расчета также достаточно надежен. Но надо иметь в виду, что возможное систематическое занижение наблюдаемых значений A_{max} за счет использования приборов с не вполне адекватной слишком низкой частотой цифровки не может быть исправлено.

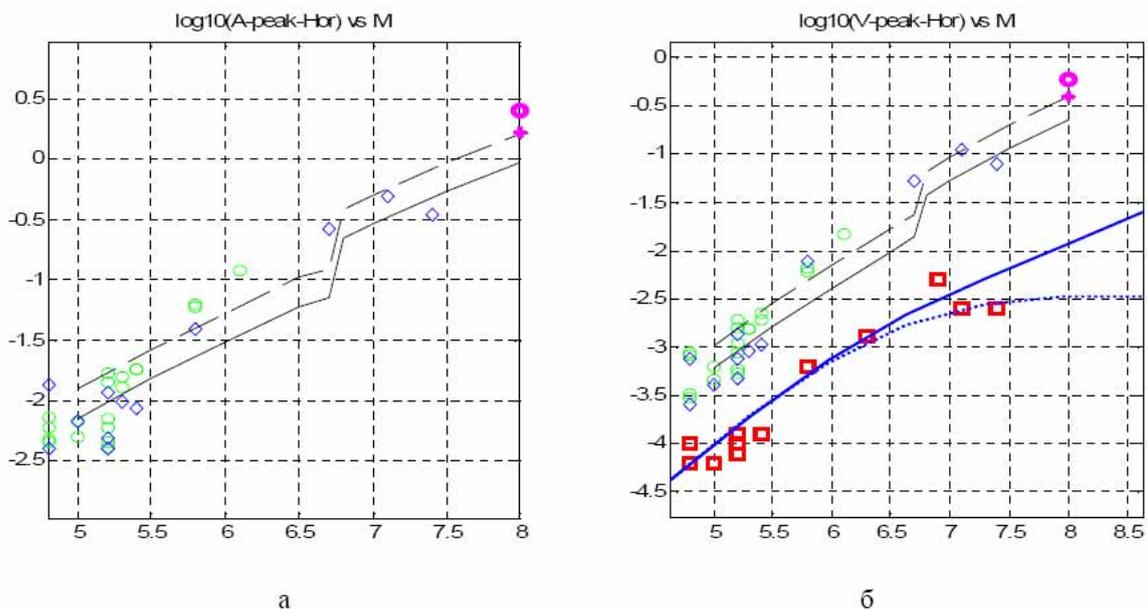


Рис 21. Средние модельные пиковые горизонтальные ускорения (а) и скорости (б) для движений грунта от Вранчских очагов на ст. Москва в зависимости от магнитуды M_w . Сплошная линия – фактический расчетный тренд для средней тенденции (50% квантиля или медианы) без внесенной эмпирической поправки в виде коэффициента 1.5. Штриховая линия – то же для тенденции 84% квантиля для случая $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$, снова без эмпирической поправки 1.5. Зеленые кружки – наблюдаемые пики на горизонтальных каналах ст Москва, синие ромбы – наблюдаемые пики на вертикальном канале ст. Москва с поправкой 1.75 за переход от вертикальной к горизонтальной компоненте. Приведены также неуверенные точки для толчков 1990, 1977 и 1986 гг. на ст. Москва, полученные при ручной цифровке. Малиновый значок «звездочка+ромбик» на штриховой линии – прогноз для $M_w=8$ и $P=84\%$ без эмпирической поправки 1.5. Малиновый кружок – то же, но с эмпирической поправкой в виде коэффициента 1.5.

На левый график также вынесена (со сдвигом -9 для графического удобства) средняя зависимость $mb(M_w)$ (нижняя пара частично слившихся кривых) по данным NEIC США (пунктир) и сети ФССН России с поправкой +0.18 (сплошная линия); прямоугольники – значения mb землетрясений Вранча.

6. Моделирование движений грунта от сильного землетрясения зоны Вранча на ст. Москва путем модификации записи слабого землетрясения из той же зоны в том же пункте (метод эмпирических функций Грина)

Один из способов моделирование движений грунта от сильного землетрясения в определенном пункте – это модификация записи слабого землетрясения в том же пункте, или использование метода эмпирических функций Грина. Такой подход имеет ряд положительных сторон, но и определенные минусы. Преимущество такого подхода - использование минимального числа предположений относительно всех участков трассы распространения сейсмических волн, кроме относительно однородной области источника. Слабое место – неизбежное использование ряда трудно проверяемых гипотез: близости «механизмов очага» (нормированных тензоров сейсмического момента) двух событий, близость их глубин и значений сброшенного напряжения. Выбранное слабое землетрясение может не быть вполне репрезентативным для изучаемой сейсмической зоны. Наконец, лучей от разных точек протяженного источника к пункту наблюдения должны быть в достаточной степени аналогичными, что делает подобный метод ненадежным при гипоцентральных расстояниях, сопоставимых с размером очага, или меньших. В случае наблюдений землетрясений зоны Вранча в Москве последняя проблема, однако, не возникает. Отметим, что почти все перечисленные слабые места присущи и методу экстраполяции спектров, примененному выше в разделе 3.

Ряд трудно проверяемых предположений приходится делать при любом подходе. В первую очередь необходимо сделать допущения касательно очаговых спектров. Конкретно, предполагается, что очаговые спектры обоих событий (и сильного землетрясения, и слабого) соответствуют некоторой спектральной модели (закону масштабирования спектров или подобия), известной с точностью до одного-двух параметров. Ниже принята классическая спектральная модель «омега-квадрат» Аки-Бруна, с двумя параметрами – сейсмический момент M_0 и сброшенное напряжение $\Delta\sigma$. Уровень изученности спектров землетрясений Вранча пока не дает оснований использовать более специфические модели; в то же время модель омега-квадрат широко применяется в мировой сейсмологии как основная или, по крайней мере, как начальное приближение.

В качестве исходных данных ниже используется запись слабого толчка на определенной компоненте. Считается, что дл слабого толчка (индекс 1) известны моментная магнитуда $M_w = M_{w1}$ и сброшенное напряжение $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1$. Далее используем модель очагового спектра «омега - квадрат» по Аки-Бруну (Brune, 1970). Введем функцию $M_0(t)$ изменения во времени сейсмического момента (момента точечного силового диполя), эквивалентного очагу землетрясения, и ее производную (скорость) $\dot{M}_0(t)$. Очаговый спектр землетрясения $\dot{M}_0(f)$, то есть амплитудный спектр от $\dot{M}_0(t)$, принимается в виде (1) как функция скалярного сейсмического момента M_0 и «корнер-частоты» f_c . При этом $M_w = (2/3) (\lg M_0 - 10.7)$. Модельное значение f_c определяется по (5) через M_0 и «сброшенное напряжение» $\Delta\sigma$. На этой основе можно получить для записей двух землетрясений с близкими очагами на одной станции поправочный коэффициент $SR(f)$ (6), который может быть использован для пересчета наблюденного спектра ускорений от (слабого) очага с значениями параметров $(M_0^{(1)}, \Delta\sigma^{(1)})$ к спектру ускорений для другого (сильного) очага с параметрами $(M_0^{(2)}, \Delta\sigma^{(2)})$.

Однако, гладкая действительная функция (6), описывающая идеальное отношение амплитудных спектров очаговых функций по Бруну, не может быть непосредственно использована как фильтр для прямой модификации наблюденного спектра слабого толчка. Причина в том, что действительная функция $SR(f)$ с нулевой фазой, будучи применена как фильтр, сохранит длительность колебаний приблизительно неизменной. Таким образом, неявно делается неверное предположение, что оба толчка имеют близкую очаговую длительность. При правильном моделировании следует «растянуть» запись слабого толчка, чтобы учесть рост длительности очагового процесса от слабого толчка к сильному. Для этого можно в качестве

оператора модифицирующего фильтра использовать свертку с нестационарной псевдослучайной последовательностью положительных импульсов («случайная гребенка»), длительность которой близка к $1/f_{c2}$. При этом модуль передаточной функции фильтра (АЧХ) неизбежно исказится относительно обсуждаемого идеального случая (6). Следующий алгоритм ведет лишь к небольшим и несистематическим искажениям.

При синтезе фильтра мы используем следующие условия:

- (1) на низких частотах ($f \ll (f_{c1} f_{c2})^{0.5}$) модуль передаточной функции фильтра совпадает с таковым для идеального фильтра;
- (2) на высоких частотах ($f \gg (f_{c1} f_{c2})^{0.5}$) передаточная функция фильтра является случайной функцией, для которой среднеквадратическое значение модуля совпадает с соответствующим (детерминированным) значением для идеального фильтра в смысле (6);
- (3) в переходной зоне (между $0.3f_{c1}$ и $3f_{c2}$) модуль передаточной функции фильтра получается гладкой интерполяцией между двумя предыдущими случаями, оставаясь близким к таковому для идеального фильтра;
- (4) фаза передаточной функции фильтра определяется фазовым спектром «случайной гребенки».

На этом пути можно получить достаточно эффективный алгоритм для решения поставленной задачи.

Важным ограничением данного подхода является наличие приемлемого отношения сигнал/шум на записи слабого толчка. Фактически это условие выполняется лишь в ограниченной полосе частот, в пределах которой и возможно получение осмысленных оценок для движения от сильного толчка.

Алгоритм моделирования и пример моделирования. Разработанный и использованный алгоритм моделирования включает следующие шаги:

- (1) Выбор слабого толчка, ввод его наблюдаемой записи, задание его магнитуды $M_w = M_{w1}$ и сброшенного напряжения $\Delta\sigma = \Delta\sigma_1$. Ввод образца шума (микросейсм).
- (2) Исследование спектра Фурье слабого толчка и сравнение с ожидаемым спектром от шума той же длительности; определение рабочей полосы частот, где спектр слабого толчка достоверен (условно, отношение амплитуд сигнал/шум должно всюду превышать три).
- (3) Задание магнитуды $M_w = M_{w2}$ и сброшенного напряжения $\Delta\sigma = \Delta\sigma_2$ для сильного (целевого) толчка. Индексы 1 и 2 будут далее относиться к слабому и сильному толчкам.
- (4) Расчет по формулам Бруна частот излома спектра («корнер-частот») $f_{c1} = f_c(M_{w1}, \Delta\sigma_1)$ и $f_{c2} = f_c(M_{w2}, \Delta\sigma_2)$ и далее «идеальных» очаговых спектров толчков $S_1(f)$ и $S_2(f)$. Расчет «идеального» отношения спектров $SR(f) = S_2(f) / S_1(f)$.
- (5) Расчет оценки очаговой длительности сильного толчка $T_{c2} = 0.7/f_{c2}$.
- (6) Синтез исходного варианта «случайной гребенки» - формы модельной очаговой функции сильного толчка, как серии положительных дельта-импульсов случайной амплитуды, управляемых пуассоновским потоком в пределах окна длительностью T_{c2} .
- (7) Корректировка амплитудного спектра случайной гребенки для выполнения условий совпадения с идеальным фильтром на низких и высоких частотах.
- (8) Объединение полученного модуля передаточной функции фильтра с фазовым спектром, заимствованным от исходной «случайной гребенки»; получаем модифицирующий оператор.
- (9) Применение модифицирующего оператора к записи слабого толчка.
- (10) Фильтрация результата полосовым фильтром в пределах рабочей полосы частот для отсека недостоверных спектральных компонент результата.

Применение расчетной схемы. Описанная расчетная схема была реализована для расчета двух конкретных случаев:

Случай 1: слабое землетрясение – толчок 2004.09.27, $M_w=5.8$ (HRV CMT), $\Delta\sigma_1=40$ бар; сильное землетрясение – толчок 1977.03.09, $M_w=7.4$ (Romcat), $\Delta\sigma=250$ бар. Значения $\Delta\sigma$ заданы по материалам работы [Gusev et al., 2002].

Случай 2: слабое землетрясение – толчок 2004.09.27, $M_w = 5.8$ (HRV CMT), $\Delta\sigma = 25$ бар (задано типовое значение); сильное землетрясение – ожидаемый опаснейший толчок, $M_w = 8.0$, $\Delta\sigma = 340$ бар.

Приведем иллюстрации для случая 1. В этом случае длительность $T_{c2} = 10.4$ с и длительность имитирующего импульса принята $T_{и} = 0.75 T_{c2} = 7.6$ с. На рис 22 приведены исходный и модифицированный вариант импульса, определяющего модифицирующий оператор, а на рис. 23 – соответствующие спектры в лог-линейном и билогарифмическом масштабах.

На основании данной схемы моделирования для случая целевого события с $M = 8$, построено 9 экземпляров-реализаций акселерограмм. См пример на рис 24. Оценки максимальных ускорений по этим реализациям составили $2.23 \pm 0.3 \text{ см/с}^2$.

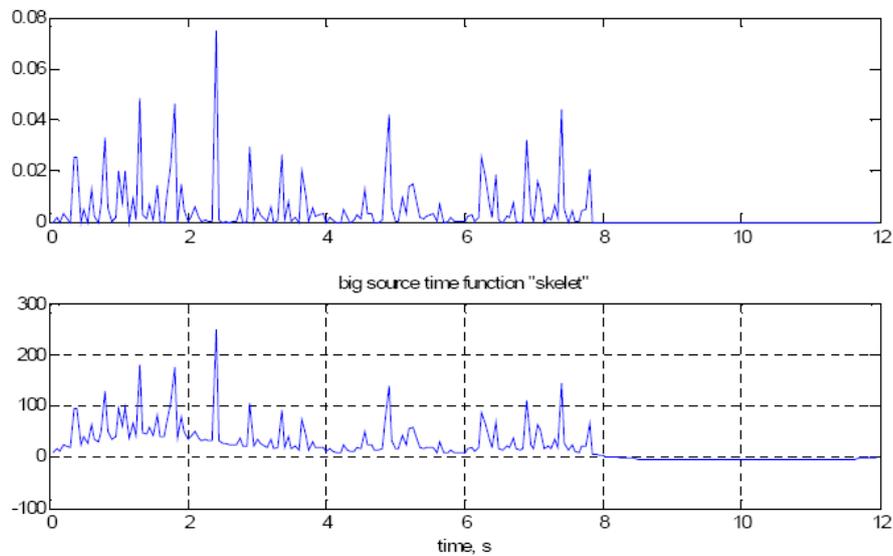


Рис. 22. Этапы синтеза оператора, преобразующего ЭГФ в целевой сигнал. Вверху: «случайная гребенка» длительностью 7.6 с с приемлемым фазовым спектром. Внизу – импульсная реакция фильтра-оператора с приемлемыми амплитудным и фазовым спектрами. Вертикальный масштаб произвольный.

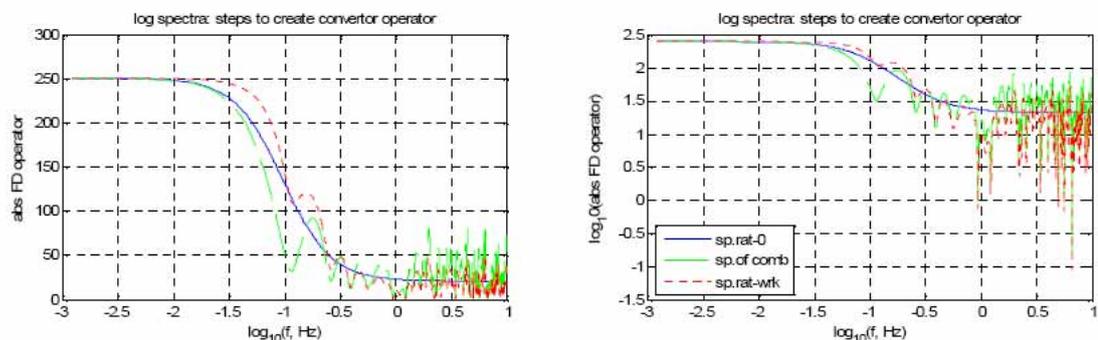


Рис 23. Спектральное представление шагов синтеза оператора, преобразующего ЭГФ в целевой сигнал. Приведен модуль спектра Фурье. Слева: гладкая сплошная линия – начальный вариант спектра оператора согласно (6), длинные штрихи – спектр «случайной гребенки», его уровень на высоких частотах слишком высок; короткие штрихи – спектр для принятого оператора. Вертикальный масштаб произвольный. Справа – тот же график с логарифмическим масштабом по ординате.

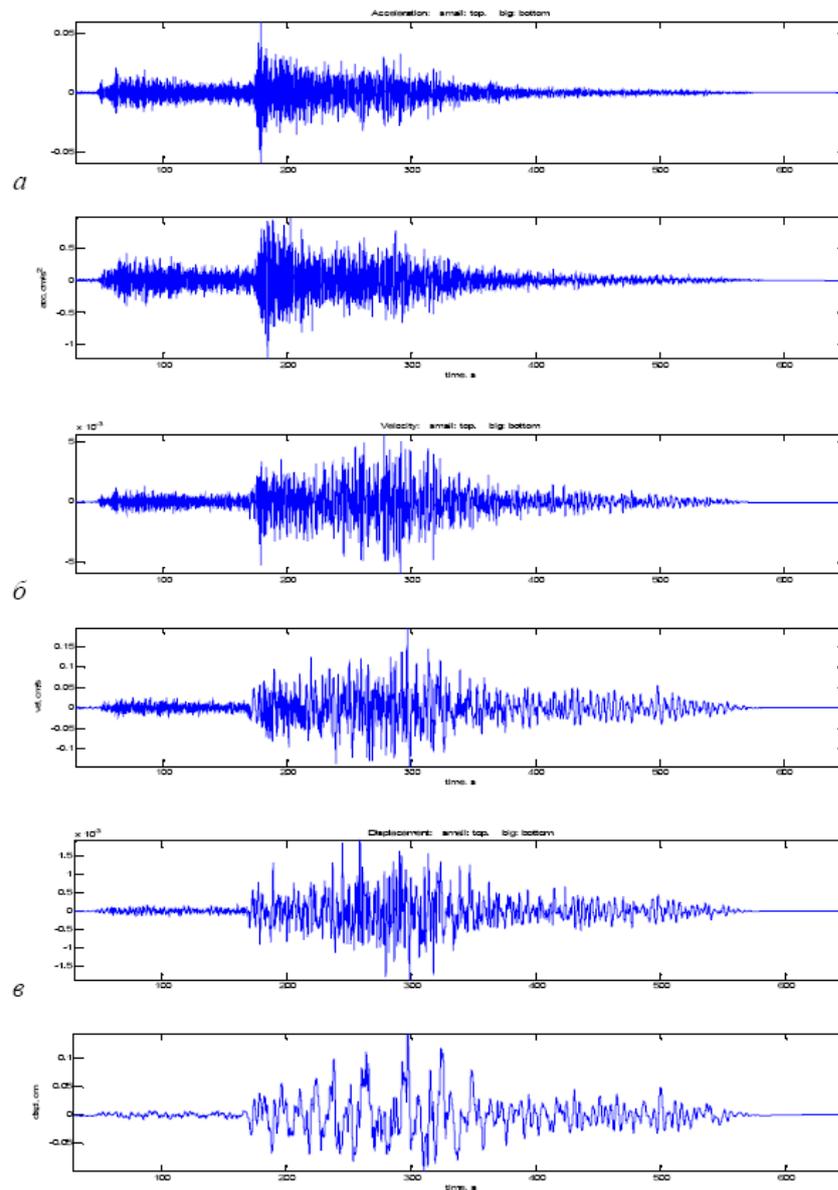


Рис 24. Трассы ускорения (а), скорости (б) и смещения (в) для ст. MOS. Вверху в каждой паре – для компоненты NS зарегистрированной исходной записи 2004 г.; внизу один вариант синтезированного сигнала сильного землетрясения.

7. Сводные оценки амплитуд

Как видно из изложенного, ряд предположений методики моделирования имеет элемент произвола, и возникает ряд вариантов результатов, из которых следует сделать выбор для рекомендаций. Обсуждение поведем в терминах значения среднего (по реализациям) максимального ускорения A . Поясним, что вся описанная схема расчета нацелена на построение корректных спектров реакции и корректных акселерограмм для полосы частот 0.05-3 Гц. Обеспечить надежность сценарных спектров реакции, бета-графиков и спектров Фурье (или спектров мощности) акселерограмм в полосе частот 3-20 Гц затруднительно из-за упомянутой необеспеченности этой части спектра исходными данными за счет недостатков аппаратуры регистрации. Значение A (но не V) может в заметной мере определяться как раз этими не вполне достоверными спектральными компонентами. Поэтому значение A может быть занижено. Его следует рассматривать скорее как масштабный коэффициент к бета-графикам, поскольку обсуждаемая ненадежность значений A несущественна для

характеризации нагрузок в полосе частот 0.05-3 Гц через комбинацию $A\beta(f)$ или через акселерограмму. Более надежны оценки V , но их использование не соответствует инженерной традиции.

Оставив данную проблему в стороне, как не принципиальную для типичных сооружений из более 4-5 этажей, перейдем к другим факторам неопределенности. Как видно из изложенного выше, эти факторы таковы:

- (1) выбор значения $\sigma(\lg A_{HF})$: 0.24 или 0.30;
- (2) использование поправочного коэффициента $K=1.5$ по материалам сравнения результатов экстраполяции с материалами регистрации 1977 г (альтернатива: $K=1$);
- (3) использование метода экстраполяции спектров Фурье (МСПФ) или метода ЭФГ.

Для МСПФ полезно также дать оценки для квантиля $P=50\%$ вместе с основными оценками для случая $P=84\%$. Сводка оценок для комбинаций дана в Табл. 7.

Таблица 6. Модельные максимальные ускорения, скорости и смещения для горизонтальной компоненты колебаний поверхности на ст. Москва от сценарного землетрясения зоны Вранча (три случая, см. текст)

Вариант	A , см/с ²	V , см/с	D , см
Случай 1, $P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$	1.44	0.32	[0.40]
Случай 2, $P=50\%$	0.83	0.19	-
Случай 3, $P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.30$	1.68	0.39	-

Таблица 7. Значения максимальных ускорения A и скорости V для вариантов сценарного землетрясения

Вариант	A , см/с ²	V , см/с
$P=50\%$, $K=1$	0.83	0.19
$P=50\%$, $K=1.5$	1.24	0.29
$P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$, $K=1$	1.44	0.32
$P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.24$, $K=1.5$	2.16	0.49
$P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.30$, $K=1$	1.68	0.39
$P=84\%$, $\sigma(\lg A_{HF})=0.30$, $K=1.5$	2.49	0.57
МЭФГ	2.23	0.51
Рекомендуемая оценка для $P=84\%$	2.40	0.55

Заключение

Таким образом, выполнена оценка параметров сейсмических воздействий на территории г. Москвы. Определены параметры очага сценарного землетрясения для г. Москвы: это землетрясение с моментной магнитудой $M_w = 8.0$ и сброшенным напряжением 325 бар, очаг которого расположен в Восточных Карпатах, в зоне Вранча. Оценка проведена для верхнего 84% квантиля распределения амплитуд, Построены сглаженные спектры Фурье и спектры реакции (при 5%-м затухании) колебаний поверхности на ст. Москва для вариантов сценарного землетрясения, оценены максимальные ускорения и скорости колебаний поверхности грунта. Рекомендуемые оценки колебаний грунта для условий ст. Москва составляют: максимальные ускорения 2.40 см/с², максимальные скорости 0.55 см/с. Оценка получена как обобщение результатов, полученных двумя методами – методом экстраполяции спектров Фурье и методом эмпирических функций Грина. Построены варианты модельных синтетических акселерограмм колебаний грунта при сценарном землетрясении.

Все оценки и расчеты сделаны для конкретного пункта – сейсмической станции «Москва». Грунт под этой станцией предлагается принять за эталонный на территории г. Москвы, а для оценки параметров сейсмических воздействий в других пунктах этой территории проводить сейсмическое микрорайонирование (СМР). При этом важно отметить,

что модификация параметров колебаний и спектров акселерограмм при переходе от эталонного грунта к какой-либо другой площадке не может считаться постоянной, не зависящей от частоты. Такие поправки должны вноситься с учетом отношений спектров, полученных на основании работ СМР.

Как показывают построенные спектры колебаний земной поверхности, максимальным значениям ускорений соответствует довольно широкий диапазон частот, в котором они могут проявляться, от ~ 0.07 до ~ 3 Гц. В таких условиях большое влияние на параметры колебаний поверхности могут иметь эффекты резонансного отклика грунтовых толщ. Усиление сейсмических колебаний грунтовыми толщами возникает вследствие перехода сейсмических волн в приповерхностные слои с меньшими значениями скоростей и плотностей, а также вследствие резонансных явлений, т.е. захвата сейсмических волн более рыхлыми слоями грунта из-за контраста импедансов этих слоев и граничащих с ними более плотных пород.

ЛИТЕРАТУРА

- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации - ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ. 1999. 57 с.
- Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97 (Главн. ред. Страхов В.Н., Уломов В.И.). Карта на 4-х листах. ОИФЗ РАН. М.: НПП Текарт, 2000.
- Уломов В.И. и др. Отчет «Оценка возможных сейсмических воздействий на территории г. Москвы в соответствии с Общим сейсмическим районированием территории Российской Федерации - ОСР-97» по Договору ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя России и ИФЗ РАН, Москва 2004.
- Gusev A., M. Radulian, M. Rizescu and G. F. Panza . Source scaling of intermediate-depth Vrancea earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 2002, 151, 879–889.
- Brune, J. N. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes, *J. Geophys. Res.* 1970, 75, 4997–5009.
- Гинсарь В.Н. Оценка повторяемости и вероятности сильных землетрясений зоны Вранча // *Buletinul Institutului de Geofizică și Geologie al AȘM*, N 1, 2005
- Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами - среднемировые и для Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 1990. №6. С.55-63.