

УДК 550.343.6

ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ В МОСКВЕ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ В ЗОНЕ ВРАНЧА

© 2010 г. В. И. Уломов

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва

E-mail: ulomov@ifz.ru

Поступила в редакцию 07.04.2009 г.

Согласно нормативным картам Общего сейсмического районирования Российской Федерации – ОСР-97, территория г. Москвы расположена в 5-балльной сейсмической зоне. Наибольшую опасность для высотных зданий в г. Москве представляют низкочастотные колебания от заглубленных очагов сильных землетрясений, происходящих в Восточных Карпатах (зона Вранча, Румыния) на расстоянии от г. Москвы около 1350 км. На основе анализа записей сейсмической станцией “Москва” Вранчских землетрясений в интервале магнитуд от $M_w = 5.0$ до $M_w = 7.4$ определены ускорения колебаний грунта в г. Москве. Путем экстраполяции параметров слабых и умеренных землетрясений в сторону крупных сейсмических событий оценены максимальные горизонтальные ускорения $A_{hor} = 2.3 \text{ см/с}^2$, ожидаемые при Вранчском землетрясении с максимальной возможной магнитудой $M_w = 8.0$. Рассчитана синтезированная акселерограмма максимального возможного эффекта на эталонном грунте г. Москвы. Показано, что перемещения грунта многомерны и не ориентированы строго по направлению на сейсмический источник. Указано на необходимость корректировки макросейсмической шкалы MSK-64 и уточнения строительных норм – СНиП II-7-81* в части оценки низкочастотных сейсмических воздействий интенсивностью 5 баллов и менее, в том числе от удаленных землетрясений.

Ключевые слова: прогноз сейсмических опасностей, сейсмические проявления в г. Москве, синтезированная акселерограмма.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1991–1997 гг. при создании в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ) карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97) определенное внимание было уделено изучению сейсмического эффекта на территории г. Москвы. Исследования касались не только близких, но и удаленных очагов сильных землетрясений, в том числе возникающих в Восточных Карпатах (зона Вранча, Румыния) [Уломов, Шумилина, 1999 а; 1999б].

В 2002–2003 гг. эти исследования были нами возобновлены в связи с начавшемся в г. Москве высотным строительством и в 2007–2008 гг. продолжены с целью подготовки нормативных документов для их проектирования. Ожидалось также, что продолжительные низкочастотные колебания, даже едва различимые на земной поверхности, и резонансные явления в грунте и строительных объектах могут существенно повлиять на их реакцию [Уломов, 2007; 2008; Уломов и др., 2007].

Только за последние неполные 70 лет в г. Москве трижды наблюдались достаточно ощутимые сей-

смические проявления, обусловленные крупными землетрясениями в зоне Вранча в 1940, 1977 и 1986 гг. с моментными магнитудами M_w , соответственно равными 7.7; 7.4 и 7.1. Заметные колебания на верхних этажах зданий наблюдались также в 1990 г. при сейсмическом событии в этой зоне с $M_w = 6.9$. Не осталось бы незамеченным москвичами и Вранчское землетрясение 2004 г. с магнитудой $M_w = 5.9$, будь оно чуть посильнее. Вместе с тем, именно его сейсмограммы, записанные в 2004 г. в цифровом виде Центральной сейсмической станцией (ЦСС) “Москва”, оказались наиболее информативными и были использованы нами при расчетах максимального возможного сейсмического эффекта на территории Москвы.

Важно также заметить, что до наших работ 2007–2008 гг. все отечественные оценки сейсмических воздействий на строительные объекты на территории европейской части страны базировались на использовании некорректно “перенормированной” акселерограммы Вранчского землетрясения 4 марта 1977 г., полученной сейсмической станцией “NIS” (Сербия), расположенной в 484 км к юго-западу от эпицентра. Оригинальная цифровая акселерограмм-

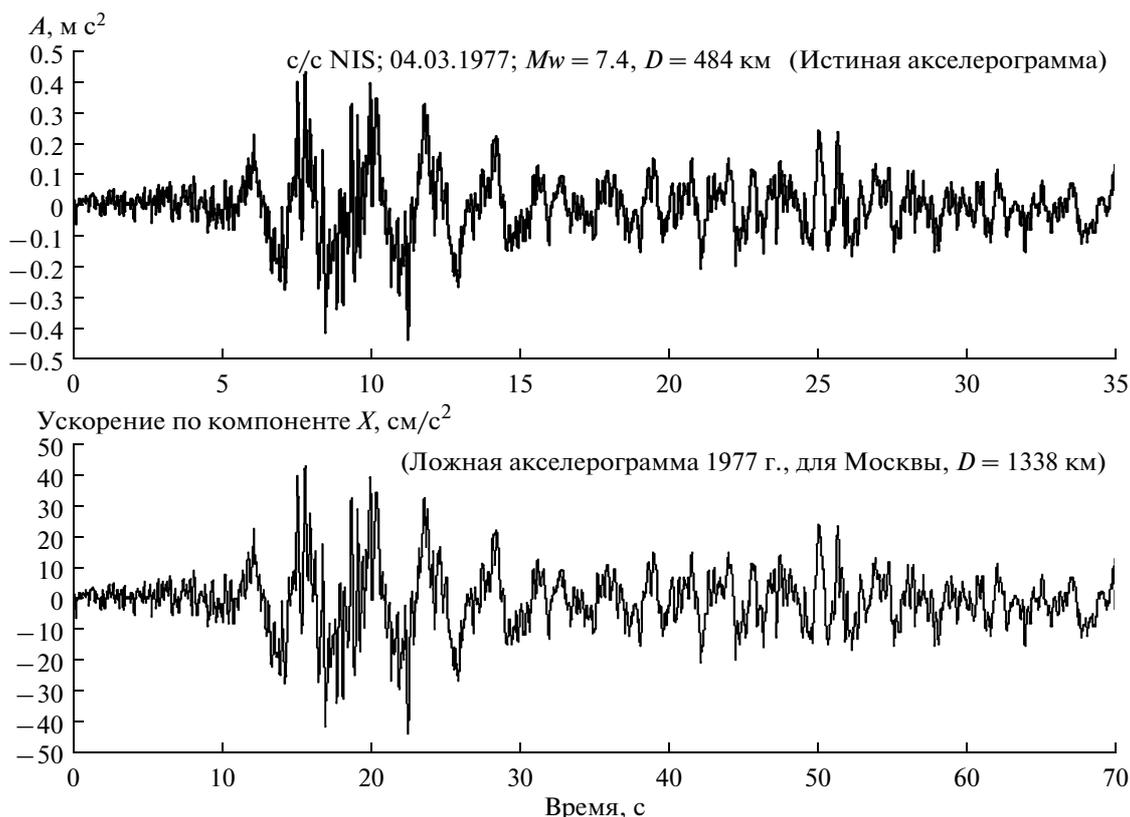


Рис. 1. Вверху – оригинальная акселерограмма горизонтальных сотрясений, полученная на сейсмостанции NIS (Сербия) при землетрясении 04.03.1977 г. с $M_w = 7.4$. Горизонтальные пиковые ускорения – 0.444 м/с^2 , вертикальные – 0.214 м/с^2 . Внизу – та же акселерограмма с искусственно измененным масштабом по оси абсцисс. В таком виде она длительное время использовалась в качестве синтезированной акселерограммы, в том числе при проектировании атомных станций в европейской части страны.

ма станции “NIS”, подвергшаяся отечественными специалистами по гидротехническим сооружениям “перенормировке”, была ими искусственно “экстраполирована” в северо-восточном направлении на расстояние до 1400 км. Эта фальсификация впоследствии стала использоваться и при расчете на сейсмические воздействия даже таких чрезвычайно ответственных сооружений, какими являются атомные станции. В таком виде, по недоразумению, она вошла и в первый нормативный документ для высотного строительства в г. Москве [Временные..., 2006].

На рис. 1 и рис. 2 отчетливо видна одна и та же конфигурация записи оригинала акселерограммы сейсмостанции “NIS” и точная ее копия с измененными масштабами по осям координат, якобы полученная на территории г. Москвы (внизу).

Как видно, при “перенормировке” реальной акселерограммы номиналы по оси ординат были сохранены ее авторами прежними, хотя эпицентрально-расстояние до г. Москвы превышало почти в три раза удаление от эпицентра сейсмостанции “NIS”. Масштаб же по оси абсцисс произвольно был увеличен в два раза. В результате для г. Москвы при

Вранчском землетрясении с $M_w = 7.4$ были искусственно приписаны пиковые ускорения перемещений грунта (PGA) с амплитудой около 40 см/с^2 , что по шкале MSK-64 соответствует почти 6 баллам. Как будет показано ниже, величина ускорений, полученная нами, оказалась в 20 раз меньше даже при максимальном возможном землетрясении с магнитудой $M_w = 8.0$ в зоне Вранча.

При “перенормировке” не были учтены и существенные изменения формы записи, возникающие с удалением от эпицентра и отражающие соответствующие годографы разных типов волн.

2. МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ

Согласно официальным нормативным картам общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97, интенсивность максимальных возможных сейсмических сотрясений на средних грунтах (грунты 2-й категории по СНиП II-7-81*) территории г. Москвы соответствует 5 баллам макросейсмической шкалы MSK-64 с вероятностью 99% не превышения такого сейсмического эффекта в течение 50-летних интервалов

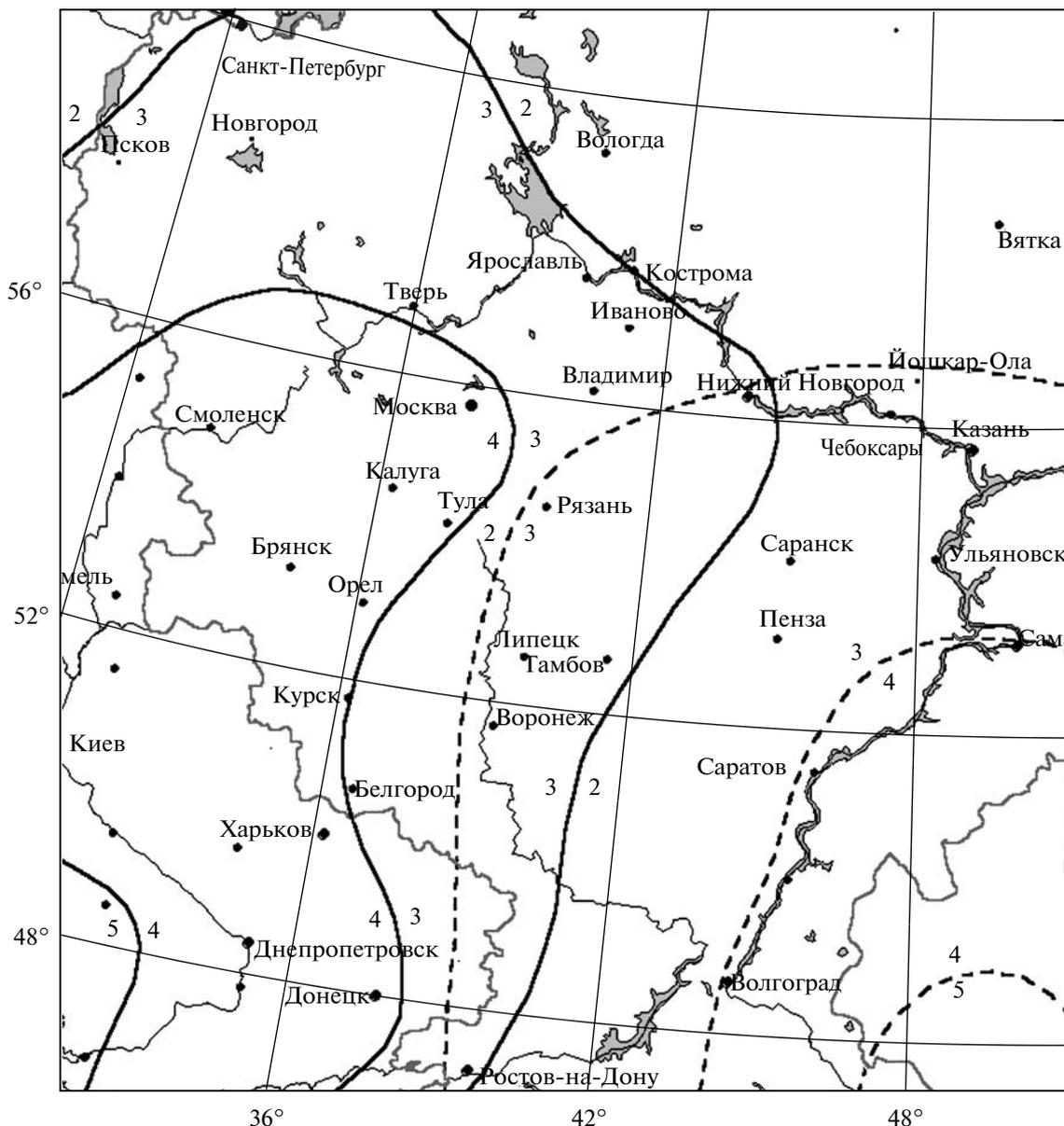


Рис. 2. Схема изосейст от сильнейших удаленных землетрясений, ощущавшихся в г. Москве (составил В.И. Уломов, по данным И.В. Ананьина, А.В. Друмя, А.А. Никонова, Г.Л. Голинского и др.). Сплошные линии – изосейсты землетрясения из зоны Вранча 1977 г. с $M = 7.4$; пунктир – изосейсты Краснодарского землетрясения 1895 г. с $M = 8.0$ на западе Туркмении. Цифрами помечена интенсивность (баллы) в зонах, в которых ощущались такие сотрясения.

времени [Сейсмическое..., 1999; Уломов, Шумилина, 1999а; 1999б].

До создания карт ОСР-97 Москва традиционно считалась сейсмически безопасным районом, хотя и было известно об ощутимых сейсмических проявлениях на территории города от удаленных очагов сильных землетрясений. Прежде всего, это относится к очаговой зоне Вранча в Восточных Карпатах (рис. 2). В Москве наблюдаются также 2–3-балльные колебания грунта от сильных землетрясений, происходящих в западной части Средней Азии, на Северном Кавказе и в Крыму. Из недавних таких

событий, ощущавшихся на верхних этажах зданий в Москве, было землетрясение 6 декабря 2000 г. на западе Туркменистана.

Вранчские землетрясения 1940, 1977 и 1986 гг., ощущались в Москве на уровне первых этажей интенсивностью до 4 баллов, а на 14–18 этажах зданий башенного типа сейсмические воздействия были еще более сильными. Так, при землетрясении 4 марта 1977 г. в юго-западном районе города, на 24 этаже железобетонного каркасного здания возникли заметные повреждения в виде небольших трещин на стыке стен и потолков. Сообщалось также, что

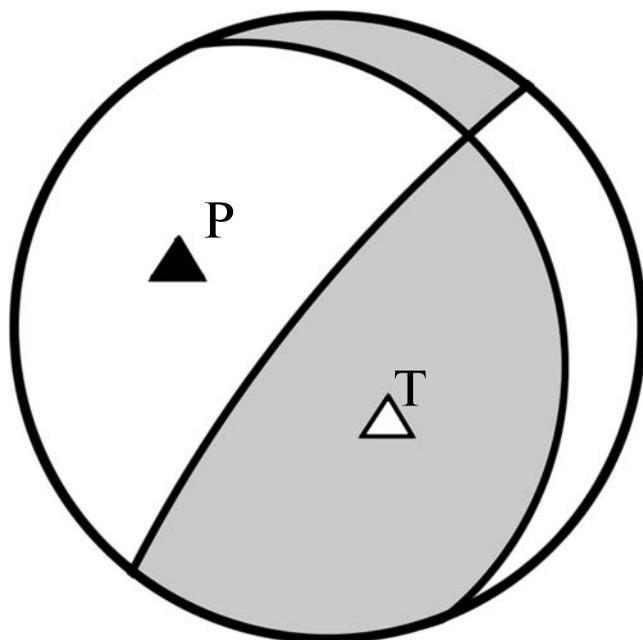


Рис. 3. Механизм очага землетрясения 27 октября 2004 г. с $M_w = 6.9$ в зоне Вранча, по данным Гарвардского СМТ-каталога. Треугольниками помечены следы осей сжатия (Р) и растяжения (Т) на нижней полусфере стереографической проекции, а дугами – следы нодальных плоскостей.

шпиль здания Московского университета на Воробьевых горах раскачивался с амплитудой до двух метров.

Относительно недавними сейсмическими событиями такого рода, во время которых сотрясения на верхних этажах высоких зданий в Москве достигали интенсивности 3–4 баллов, были Вранчские землетрясения 30 и 31 мая 1990 г.

Район Вранча, расположенный в Румынии на юго-восточном изгибе горных сооружений Карпат, является одной из наиболее активных сейсмических областей Европы. Очаговая область представляет собой почти вертикальный блок литосферы, погружающийся на глубину до 180 км и более. Самые крупные очаги расположены очень компактно в интервале глубин 80–160 км, занимая в плане площадь размером 30×60 км².

Механизм подвижки пород в очаге Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. с $M_w = 5.9$, определенный на основе знаков первых вступлений Р-волн и изображенный на рис. 3, является типичным и для других крупных сейсмических событий на этих глубинах в этой зоне. Распределение же механизмов очагов слабых землетрясений, как обычно, менее упорядочено, поскольку связано со сбросом упругих напряжений второстепенными разломами, более хаотично расположенными в пространстве.

Как показано в работах [Друмя и др., 2006], подвижки в очагах землетрясений 1977, 1986 и 1990 гг.,

определенные разными методами, хорошо согласуются между собой. Обе возможные плоскости разрыва имеют северо-восточное простирание, находятся в хорошем соответствии с простиранием области расположения многочисленных афтершоков и практически совпадают с вытянутостью изосейст в сторону г. Москвы. Одна из плоскостей крутая, другая – более пологая. Подвижки по ним представлены надвигом с небольшой компонентой сдвигов. Ось растягивающего напряжения (Т) почти вертикальна, сжимающего (Р) – близгоризонтальна и ориентирована в северо-западном направлении.

Сильные землетрясения, происходящие в зоне Вранча, сопровождаются разрушительным эффектом не только на румынской территории, но и в соседних европейских странах.

Недавние исследования румынских сейсмологов указали на специфику Вранчских землетрясений, отражающую, с одной стороны, более высокую скорость разрыва пород в заглубленных очагах по сравнению с внутрикоровыми, и с другой стороны – большой сброс упругих напряжений при подвижках пород в сейсмическом очаге. Вычисления были выполнены для двух типичных источников на глубине $h = 90$ км (моментная магнитуда $M_w = 7.4$) и на глубине $h = 150$ км ($M_w = 7.7$). Для более глубокого очага затухание сейсмического эффекта с удалением от эпицентра оказалось значительно меньше на больших расстояниях, а на меньших же наблюдался противоположный эффект.

Первый очаг соответствует землетрясению 4 марта 1977 г., произошедшему в верхней части очаговой области Вранча, второй связывается с землетрясением 10 ноября 1940 г. с гипоцентром на глубине 150 км. Механизмы подвижки пород в каждом из этих очагов оказались схожими между собой. Параметры пикового ускорения (PGA), скорости (V) и перемещения (D) грунта в г. Бухаресте, который особенно подвержен Вранчским землетрясениям, составили:

$$1977 \text{ г.} - \text{PGA} = 0.23 \text{ g}, V_{\text{max}} = 27 \text{ см/с},$$

$$D_{\text{max}} = 18 \text{ см};$$

$$1940 \text{ г.} - \text{PGA} = 0.52 \text{ g}, V_{\text{max}} = 105 \text{ см/с},$$

$$D_{\text{max}} = 42 \text{ см}.$$

Во время землетрясения 1977 г. 35 высотных зданий в Бухаресте практически полностью разрушились. Погибло более 1500 человек. Оказались разрушенными и два других румынских города, удаленных примерно на 200 км от эпицентральной области.

Таким образом, вытянутость изосейст Вранчских землетрясений в сторону г. Москвы обусловлена относительно слабым затуханием сейсмических волн и аналогичной ориентацией очаговой области Вранча. Огромные размеры площадей сейсмических сотрясений объясняются заглубленным залеганием очагов этих землетрясений, относящемся к

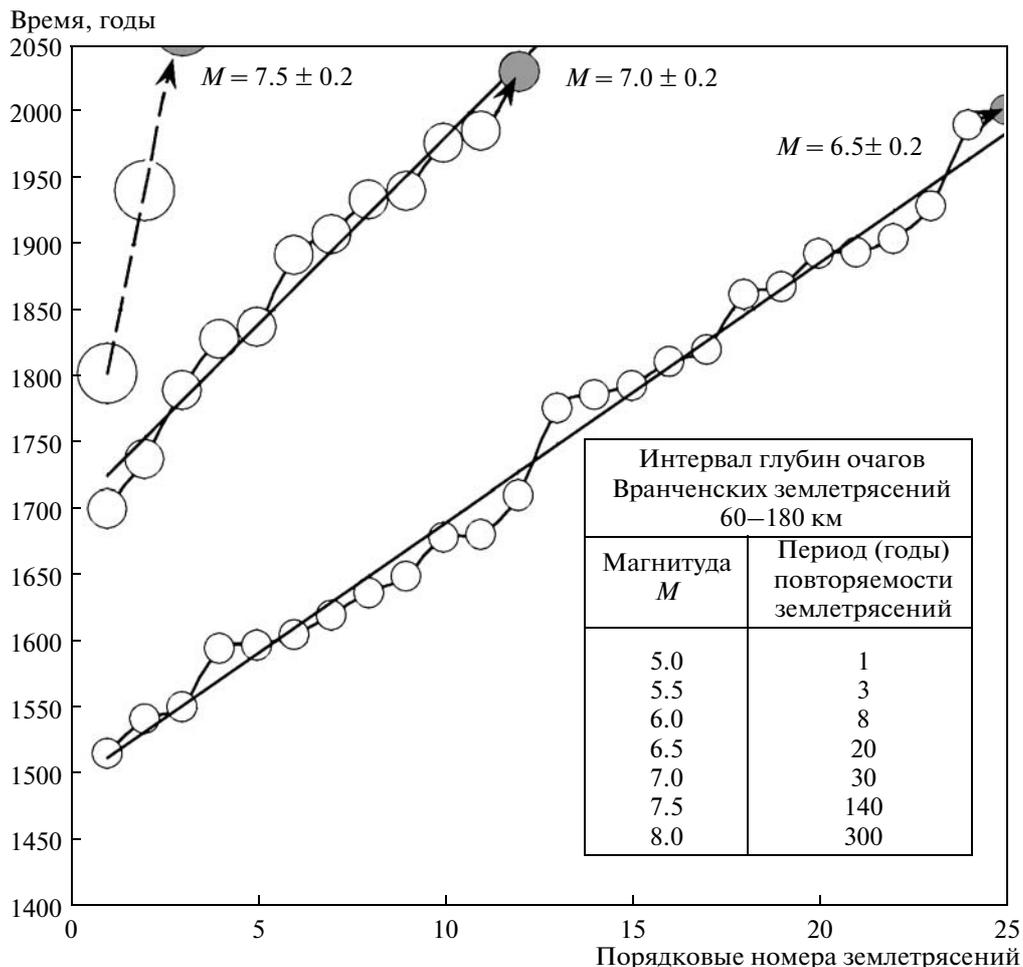


Рис. 4. Сейсмический режим очаговой зоны Вранча, расположенной на глубине 60–180 км. Показана последовательность возникновения произошедших (белые кружки) и прогнозируемых (серые кружки) сильных Вранчских землетрясений с магнитудами более 6.5 ± 0.2 .

так называемым промежуточным глубинам (intermediate depth).

Рис. 4 иллюстрирует сейсмический режим очаговой области, расположенной на глубине 60–180 км в зоне Вранча. Показана последовательность возникновения произошедших и прогнозируемых крупных землетрясений, которые могут ощущаться в г. Москве. Здесь же приведена таблица, характеризующая среднюю повторяемость сейсмических событий разных магнитуд.

Говоря об ожидаемом сейсмическом эффекте на территории г. Москвы, следует иметь в виду, что в последнее время сейсмическая обстановка в городе с каждым годом ухудшается [Москва: геология и город, 1997]. Причиной повышения сейсмической уязвимости города является подтопление, при котором водоносный горизонт поднимается до глубины менее 3 метров, а также карстовые провалы и суффозионные процессы.

3. ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ОСНОВЕ КАРТ ОСР-97

Условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, и флуктуации сейсмического режима на той или иной территории делают приемлемым лишь вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. Иными словами, риск всегда будет иметь место, но он должен быть правильно оценен и сведен к минимуму. Такая концепция заложена в комплекте нормативных карт сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97, вошедших в 2000 г. в состав строительных норм и правил — СНИП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» [Строительные..., 2000]. Вероятностный подход позволяет оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных категорий ответственности и сроков службы.

Карты ОСР-97 (А, В, С), включенные в СНИП II-7-81*, предназначены для гражданского и промышленного строительства. Оценка степени сей-

Таблица 1. Оценка сейсмического эффекта на территории г. Москвы для различных интервалов времени повторяемости сотрясений и добротности среды

Период повторяемости T , годы	Тип карты	Интенсивность I (баллы) при разной добротности Q геологической среды	
		Q_1	Q_2
100	—	<3	3.2
250	—	<3	3.6
500	ОСР-97А	<3	3.8
1000	ОСР-97В	<3	4.2
2500	—	3.4	4.4
5000	ОСР-97С	4.1	4.6
10000	ОСР-97D	4.6	5.0

сейсмической опасности осуществляется на трех уровнях, отражающих расчетную интенсивность сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемых на средних грунтах (грунты II категории, по СНиП II-7-81*) с заданной вероятностью в течение определенного интервала времени. Так, карта ОСР-97А соответствует 10%-ному риску возникновения и возможного превышения (или 90% не превышения) указанных на ней величин сейсмической интенсивности в течение 50-летних интервалов времени. Она применяется при массовом строительстве жилых, общественных и производственных зданий. Карты ОСР-97В и ОСР-97С, соответствующие 5%- и 1%-ному риску превышения (или 95% и 99% не превышения), предназначены для проектирования и строительства объектов повышенной ответственности и особо ответственных сооружений, в том числе и высотных зданий. Эти три карты соответствуют периодам 500, 1000 и 5000 лет повторяемости сейсмического эффекта в любом географическом пункте зон, выделенных на указанных картах. Для чрезвычайно ответственных строительных объектов, каковыми являются атомные станции (АС), была создана карта ОСР-97D, соответствующая периоду повторяемости $T = 10000$ лет. Она также вошла в соответствующие строительные нормы.

Карты ОСР-97 впервые охватили сейсмическим районированием всю территорию страны, включая слабоактивные платформенные территории и шельфы внутренних и окраинных морей.

Восточно-Европейская платформа (ВЕП), в центре которой расположена Москва, характеризуется относительно слабой сейсмичностью и очень редко возникающими здесь местными землетрясениями с интенсивностью в эпицентре до 6–7 баллов. Такие явления известны, например, в районе городов Альметьевск (землетрясения в 1914 и 1986 гг.), Елабуга (1851 г., 1989 г.), Вятка (1897 г.), Сыктывкар (1939 г.), Верхний Устюг (1829 г.), Калининград

(2004 г.) и др. Аналогичные по силе землетрясения возникают на Среднем Урале, в Предуралье, Приазовье, Поволжье, в районе Воронежского массива. На Кольском полуострове и сопредельной с ним территории отмечены и более крупные сейсмические события (Белое море, Кандалакша, 1626 г.).

Наряду с этими сейсмическими явлениями на территории европейской части страны, как уже упомянуто выше, ощущаются колебания от сильных землетрясений, происходящих в сопредельных регионах. На северо-западе ощущаются землетрясения Скандинавии (Норвегия, 1817 г.), на юге — сильные землетрясения Прикаспийского бассейна (Туркменистан, 1895, 2000 гг.), Кавказа (Спитак, Армения, 1988 г.), Крыма (Ялта, 1927 г.).

Карты ОСР-97, в зависимости от рассматриваемого интервала времени (500, 1000, 5000 и 10000 лет) заметно изменяют не только свои номиналы, но и начертание сейсмических зон. Чем продолжительнее период “ожидания” сейсмической опасности, тем она может оказаться серьезнее. И наоборот, площади сейсмических зон уменьшаются с уменьшением длительности периода. Как видно на фрагменте карты ОСР-97С (рис. 5), характеризующей среднюю повторяемость сейсмического эффекта в любом географическом пункте один раз за 5000 лет, ближайшая к Москве 6-балльная зона удалена от центра города на расстояние около 120 км и частично захватывает лишь восточную часть Московской области.

В табл. 1 приведены расчеты для различных интервалов времени повторяемости сейсмического эффекта на территории г. Москвы в соответствии с двумя принятыми параметрами добротности Q_1 и Q_2 геологической среды [Гусев, Шумилина, 1999]. При этом величина Q_1 , соответствующая преимущественно внутрикоревой сейсмичности, в ОСР-97 использовалась практически для всей территории Северной Евразии, а величина Q_2 была специально введена для расчета затухания сейсмического эффекта вдоль трассы от заглубленных очагов зоны Вранча до ВЕП, в том числе и до г. Москвы. Основанием для введения повышенной добротности Q_2 послужили, с одной стороны, отмеченные румынскими сейсмологами уменьшение затухания сейсмической интенсивности с удалением от эпицентра, а с другой стороны, — вытянутость наблюдаемых изосейст в северо-восточном направлении и сейсмический эффект на территории г. Москвы.

Одновременно для тех же периодов повторяемости сейсмического эффекта различной интенсивности выполнен вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) на территории Москвы (рис. 6). Аппроксимирующая прямая (экспонента) описывается приведенным на рисунке уравнением, позволяющим вычислять интенсивность сотрясений на территории Москвы для любого заданного периода повторяемости сейсмического эффекта, в том числе и в долях балла. Последнее можно ис-

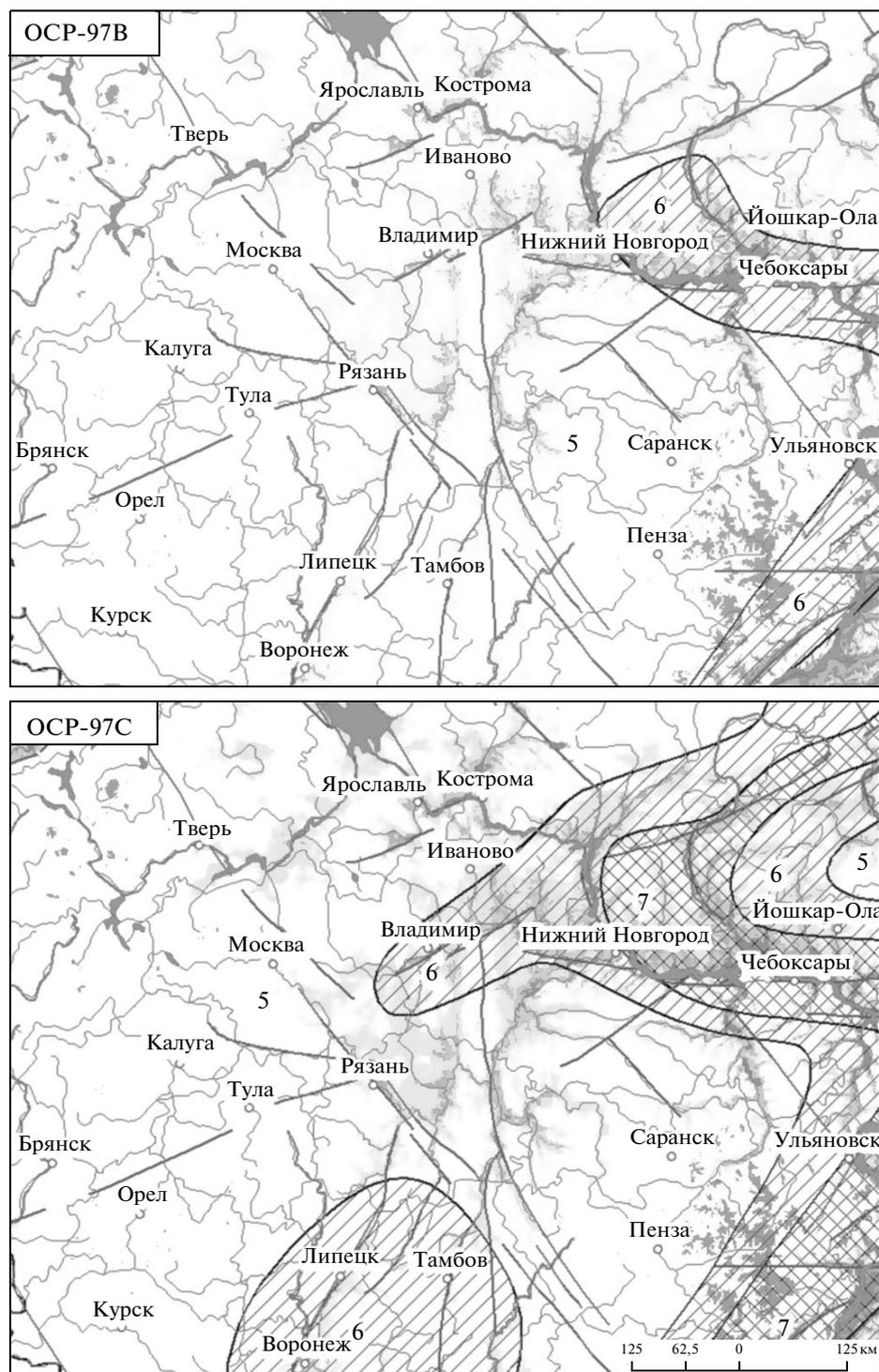


Рис. 5. Фрагменты карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97В и ОСР-97С, характеризующих максимально возможный сейсмический эффект с вероятностью 95% и 99% его не превышения в течение 50 лет. Разной штриховкой показаны 6- и 7-балльные зоны сейсмической интенсивности, а отрезками – местоположение тектонических разломов.

пользовать при сейсмическом микрорайонировании (СМР) территории, когда влияние местных грунтовых условий так же оценивается дробными приращениями к исходному баллу.

Как видно из табл. 1 и рис. 6, даже для самого длительного интервала времени $T = 10000$ лет (карта ОСР-97D) сейсмический эффект не должен превышать 5 баллов на грунтах 2-й категории.

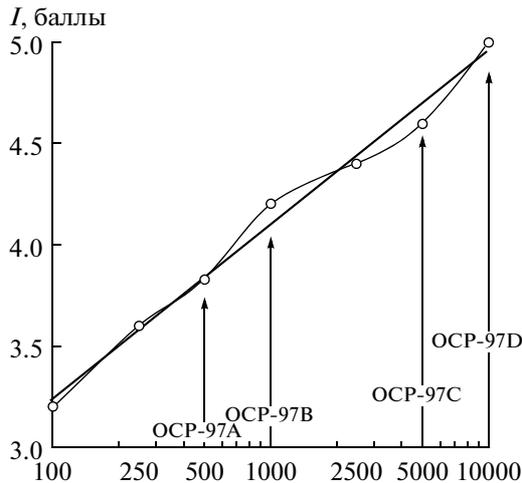


Рис. 6. Вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО) на территории Москвы на основе электронной базы данных ОСР-97. Точечные значения интенсивности вычислены для периодов 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000 и 10000 лет. Стрелками указаны оценки соответствующих карт ОСР-97. Аппроксимирующая прямая (экспонента) позволяет вычислять интенсивность сотрясений для любого заданного периода повторяемости сейсмического эффекта.

Таким образом, комплект карт ОСР-97 для территории г. Москвы достаточно уверенно оценивает “исходный” сейсмический эффект в 5 баллов с вероятностью возможного его превышения не более 1.0–0.5% (карты ОСР-97С и ОСР-97D).

Наряду с вероятностными оценками сейсмической опасности, нами выполнены также детерминистские расчеты уровня сейсмических воздействий на территории г. Москвы на основе сценарных очагов землетрясений в зоне Вранча с магнитудами M_w – 7.0, 7.5 и 8.0, представленных в виде площадок соответствующих размеров и единой ориентации, отражающей механизм реальных очагов (см. рис. 3). Расчет осуществлялся по той же методике, что и в ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999б]. Однако при этом сейсмический эффект рассматривался независимо от каждого конкретного очага и поэтому оценки являлись детерминистскими, т.е. не учитывающими особенностей сейсмического режима зоны Вранча. Полученные величины интенсивности сотрясений относились к средним грунтовым условиям и также не превышали 5 баллов, в том числе и в случае максимального возможного сейсмического события с магнитудой $M_w = 8.0$.

4. ОБ ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В 2002–2003 гг. нами были исследованы сейсмограммы ЦСС “Москва” с целью получить представления об интенсивности и спектральном составе

сотрясений на территории г. Москвы при наиболее сильных Вранчских землетрясениях 1977, 1986 и 1990 гг. Тогда же впервые был выполнен спектральный анализ и для менее сильных и не ощутимых в Москве сейсмических событий, записи которых в последние годы были получены в цифровом виде на сейсмических станциях “Москва” и “Обнинск”. Идея состояла в выяснении возможностей экстраполяции параметров сейсмических записей слабых землетрясений в сторону наиболее крупных. Такой подход был некоторой модификацией методики, предложенной в работе [Аптикаев, Эртелева, 2002]. Однако в нашем случае акселерограммы не подбирались по некоторой аналогии из различных очаговых зон, а использовались записи из одной и той же четко локализованной очаговой области зоны Вранча. Это подчеркивает качество полученных акселерограмм и достоверность их количественного анализа.

Поскольку на ЦСС “Москва” до 1999 г. регистрация землетрясений осуществлялась лишь в аналоговой форме на фотобумаге, сейсмограммы трех указанных выше землетрясений были оцифрованы нами вручную. Причем из-за того, что при больших амплитудах даже специально заглубленная аппаратура станции зашкаливала, оказалось возможным оцифровать только вертикальную (т.е. не самую интенсивную) составляющую трехкомпонентной записи. В случае же наиболее сильного Вранчского землетрясения 4 марта 1977 г. была оцифрована лишь начальная часть вертикальной составляющей (рис. 7). Как будет показано ниже, эта запись оказалась практически непригодной для анализа.

Работа выполнялась в два хронологических этапа. Первый, как уже сказано, относился к 2002–2003 гг. Исполнителями исследований от ИФЗ были В.И.Уломов (руководитель проекта), И.В.Горбунова, Л.С.Шумилина и Н.С.Медведева, а от Геофизической службы РАН В.Д.Феофилактов и В.Ф.Бабкина. Второй этап (2007–2008 гг.) в значительной степени был стимулирован самым крупным за последние 17 лет землетрясением в зоне Вранча, случившимся 27 октября 2004 г. и имевшим магнитуду $M_w = 5.9$. На ЦСС “Москва” впервые для такого события была получена цифровая запись. На этом этапе в наших исследованиях приняли участие А.А.Гусев (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН) и О.В.Павленко (ИФЗ РАН). Полученные ими результаты подготовлены к печати в виде отдельной статьи “Сценарные землетрясения для оценки сейсмических нагрузок в г. Москве: параметры и модельные движения грунта”.

В табл. 2 приведен перечень исследованных нами землетрясений. События 1977, 1986 и в 1990 гг., как уже сообщалось, ощущавшиеся на территории Москвы, зарегистрированы аналоговой, а менее сильные, произошедшие в 1999–2005 гг. – цифровой аппаратурой.

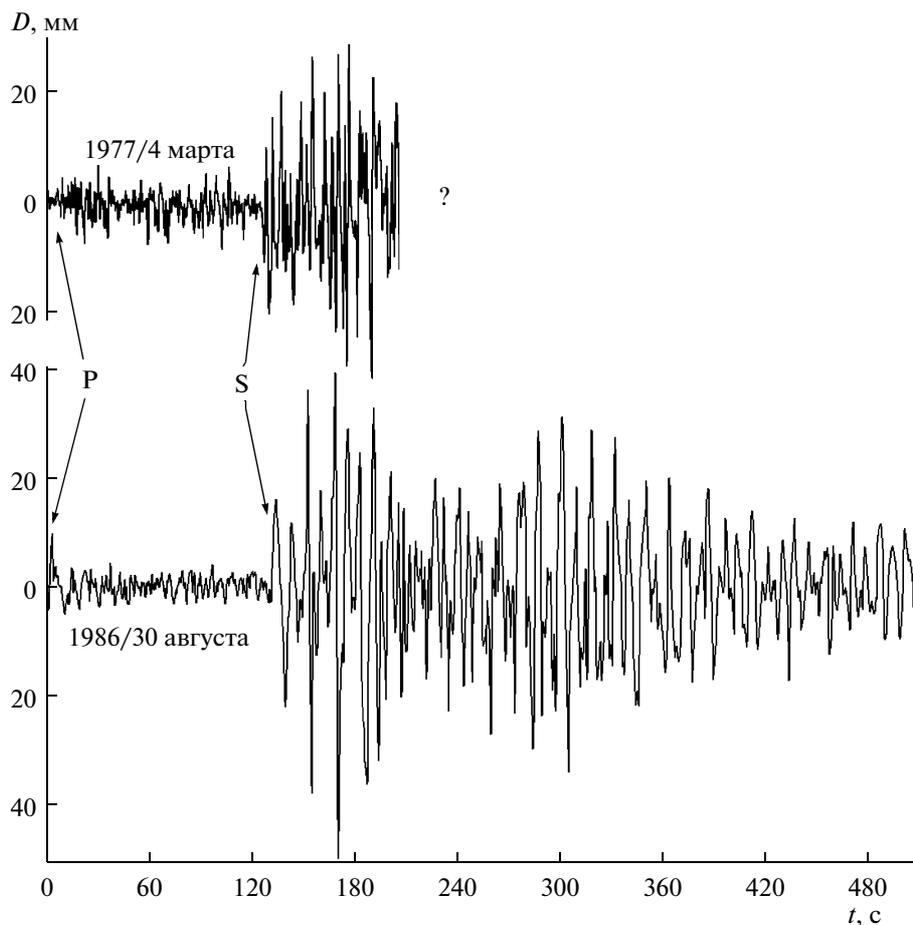


Рис. 7. Оцифрованные участки вертикальных составляющих аналоговых записей, полученных сейсмической станцией “Москва” при землетрясениях в зоне Вранча 4 марта 1977 г. с $M_w = 7.4$ и 30 августа 1986 г. с $M_w = 7.1$, ощущавшихся на территории г. Москвы.

Наиболее полно выглядит запись землетрясения 1986 г. (рис. 8), на которой продолжительность достаточно интенсивных сотрясений на вертикальной составляющей превышает 8 минут. В случае же землетрясения 1977 г. более или менее читаемый участок записи едва достигает трех минут. Поскольку по записанным на фотобумаге сейсмограммам землетрясений 1977, 1986 и 1990 гг. удалось оцифровать лишь одну вертикальную составляющую, в основу сопоставления сильных и слабых землетрясений была положена эта компонента.

Рис. 9 иллюстрирует пример оригинальных трехкомпонентных записей сейсмостанциями “Москва” и “Обнинск” Вранчского землетрясения 28 апреля 1999 г. с $M_w = 5.4$. При обработке цифровых сейсмограмм слабых сотрясений нами рассматривались две группы волн — продольных P и S + L, объединивших поперечные (S) и поверхностные (L) волны.

Деконволюция наблюдаемых сейсмограмм осуществлялась с учетом параметров и амплитудно-ча-

стотных характеристик (АЧХ) регистрирующей аппаратуры.

На рис. 10 приведены графики спектральной плотности ускорений движения грунта, рассчитанные для модуля Фурье-спектра и построенные по вертикальным составляющим трехкомпонентных записей. Для лучшего восприятия выполнено сглаживание графиков прямоугольным окном шириной 0.025 Гц. При спектральном анализе в группах P и S + L-волн делались выборки максимально возможной длительности: для P-волн — от первого вступления до вступления S-волны, а для S + L-волн — от вступления S до конца поверхностных волн, т.е. почти до уровня шума.

Переход от спектров Фурье к спектрам реакции, используемым в строительной практике, нами не осуществлялся и графики коэффициентов динамичности не строились, за исключением одного случая, приведенного в качестве примера ниже (см. рис. 12).

На рис. 10 обращает на себя внимание сходство по конфигурации графиков спектральной плотно-

Таблица 2. Каталог Вранчских землетрясений, записи которых использовались при анализе сейсмической опасности на территории г. Москвы

Дата землетрясения	Моментная магнитуда, M_w
Аналоговые сейсмограммы	
1977/4 марта	7.4
1986/30 августа	7.1
1990/30 мая	6.9
1990/31 мая	6.1
Цифровые сейсмограммы	
1999/28 апреля	5.4
2001/24 мая	5.3
2001/20 июня	5.2
2002/30 ноября	5.1
2004/27 сентября	5.2
2004/27 октября	5.9
2005/14 мая	5.2
2005/18 июня	5.0
2005/13 декабря	5.2

сти для всех рассмотренных сейсмических событий, сильных и слабых, в широком интервале магнитуд M_w – от 5.1 до 7.4. Это еще раз подчеркивает актуальность изучения современных цифровых записей на территории г. Москвы даже при очень слабых, но многочисленных проявлениях Вранчских землетрясений на территории города, и открывает новые возможности для актуализации инженерных решений.

Легко обнаружить интенсивную низкочастотную составляющую сейсмических колебаний, особенно опасную для высотных строительных объектов. Однако следует также иметь в виду, что на низких частотах (периоды 10 с и более) результаты сейсмометрических измерений недостаточно надежны.

Рис. 11 иллюстрирует три проекции (восток–запад, север–юг и вертикаль) цифровой акселерограммы движения грунта под сеймостанцией “Москва” во время сильного Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. с магнитудой $M_w = 5.9$ и глубиной очага около 100 км. Ниже на этом рисунке в том же горизонтальном, но в уменьшенном вертикальном масштабе представлен единственный доступный для анализа фрагмент вертикальной составляющей акселерограммы землетрясения 4 марта 1977 г., повсеместно ощущавшегося в г. Москве.

Сравнивая амплитуды ускорений на сопоставимых участках записей 1977 и 2004 гг., в первом приближении можно было обнаружить, что максимальные ускорения на эталонном грунте, за который нами принят грунт ЦСС “Москва” на глубине 4 метра от земной поверхности, в 1977 г. не намного превышали 1 см/с^2 [Уломов, 2008]. Поначалу столь

низкие величины ускорений вызвали сомнения в их реалистичности не только у проектировщиков и строителей, но и у некоторых сейсмологов. Однако, как будет показано ниже, ускорения такого же порядка были подтверждены новыми расчетами и построениями. К ним же пришли и другие исследователи, в том числе из ранее усомнившихся в полученных нами результатах.

При сравнении графиков коэффициентов динамичности (рис. 12), составленных по вертикальной составляющей акселерограммы Р-волн землетрясения 2004 г. (1) и по ее фрагменту (2), эквивалентному по продолжительности имеющейся части записи землетрясения 1977 г., можно обнаружить существенную потерю на записи землетрясения 1977 г. полезной информации о низкочастотной компоненте сейсмических колебаний, наиболее важной для расчетов сейсмических воздействий на высотные строительные объекты. Это же видно и на рис. 10, где низкочастотная часть графика спектральной плотности для землетрясения 1977 г. заметно понижена по сравнению с графиком меньшего по магнитуде землетрясения 1986 г.

Поэтому, а также по причине неполноценности записи 1977 г., дальнейшие расчеты сейсмического эффекта в г. Москве нами выполнялись путем сопоставления цифровых акселерограмм умеренных и слабых землетрясений с записью вертикальной составляющей землетрясения 1986 г.

5. О СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ МОСКВЫ ПРИ МАКСИМАЛЬНОМ ВОЗМОЖНОМ ВРАНЧСКОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

В табл. 3 приведены основные параметры Вранчских землетрясений разных магнитуд, использовавшиеся нами для измерения наблюдаемых и вычисления прогнозируемых ускорений. Как видно из таблицы, для всех цифровых записей были определены величины ускорений по всем трем составляющим – вертикальной (Z) и двум горизонтальным (EW , NS). В крайнем правом столбце приведены значения полного вектора горизонтальных ускорений ($A_{\text{гор}}$). Последняя строка таблицы относится к прогнозируемому землетрясению с $M_w = 8.0$.

Для землетрясения 1977 г. с $M_w = 7.4$ в правой графе таблицы приведена ориентировочная величина полного вектора ускорений, показанная в скобках. Для землетрясения 1986 г. с $M_w = 7.1$ приемлемыми оказались ускорения $A_z = 0.08 \text{ см/с}^2$ в вертикальной составляющей в продольных волнах. Полагая подобие сейсмограмм землетрясений с магнитудами 5.9 и 7.1, что правомерно для крупных очагов Вранчской зоны, можно провести сравнение соотношений амплитуд ускорений A_z для этих двух сейсмических событий. Так, основываясь на величине отношения $A_{\text{гор}}/A_z = 3.9$ для землетрясения

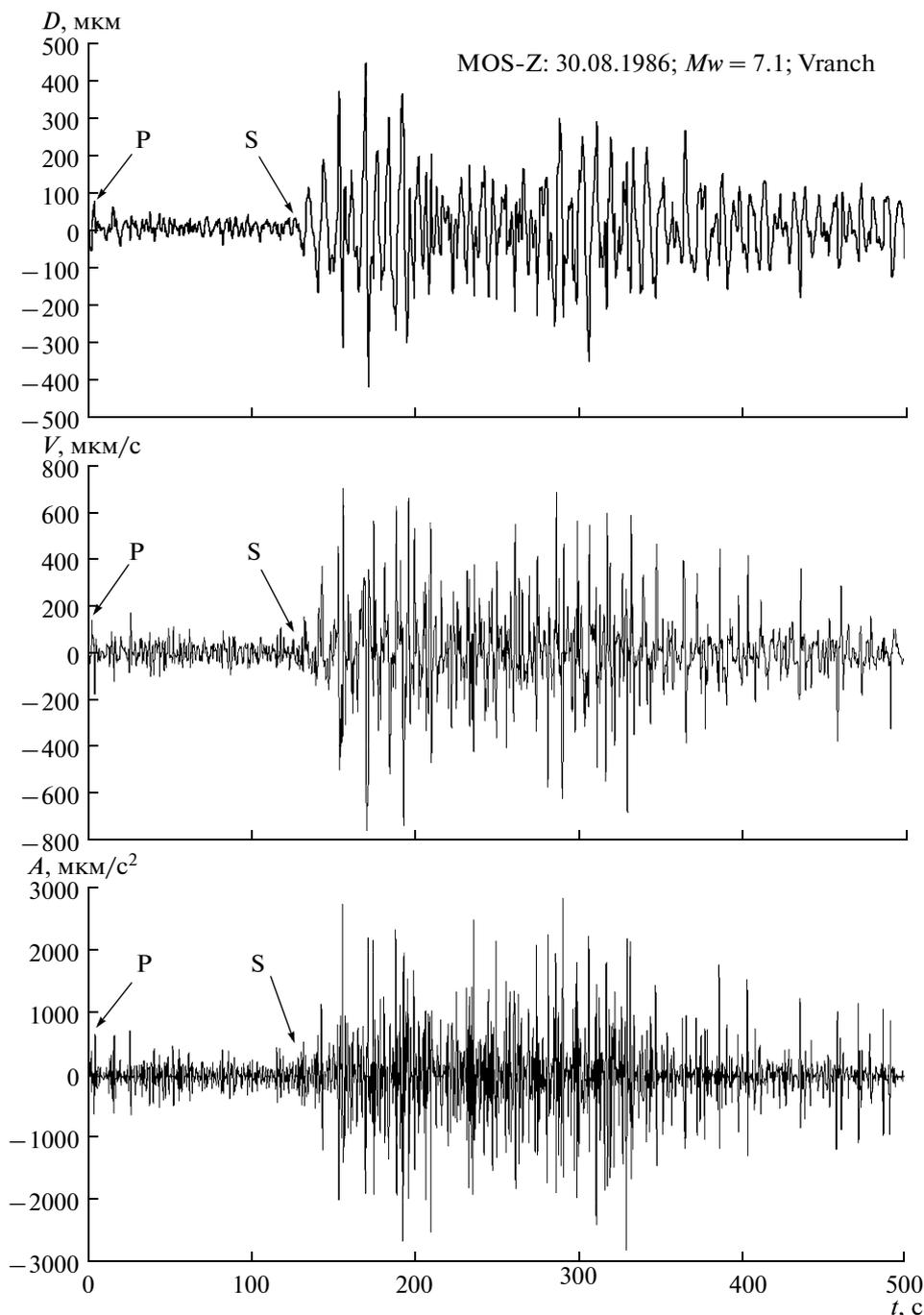


Рис. 8. Смещения (D), скорости (V) и ускорения (A), определенные по вертикальной составляющей аналоговой записи сейсмической станцией “Москва” Вранчского землетрясении 30 августа 1986 г. с $M_w = 7.1$. Стрелками помечены моменты вступления на станцию “Москва” продольных (P) и поперечных (S) волн.

2004 г., было получено значение $A_{\text{hor}} = 0.312 \text{ см/с}^2$ для события 1986 г.

Данные табл. 3 графически представлены на рис. 13, где они интерпретированы двояким образом. Здесь приведена зависимость максимальных горизонтальных ускорений A (см/с^2) движений грунта под сейсмостанцией “Москва” от магнитуды

M_w землетрясений в зоне Вранча. Черными точками показаны значения ускорений, приведенные в табл. 3. Аппроксимация, построенная по всем этим данным, изображена пунктиром, а сплошной линией показана зависимость, полученная по наиболее уверенным значениям ускорений, т.е. полностью исключая из рассмотрения событие 1977 г. (т.е. $A_{\text{hor}} = 1.0 \text{ см/с}^2$). Прогнозируемому сейсмическому со-

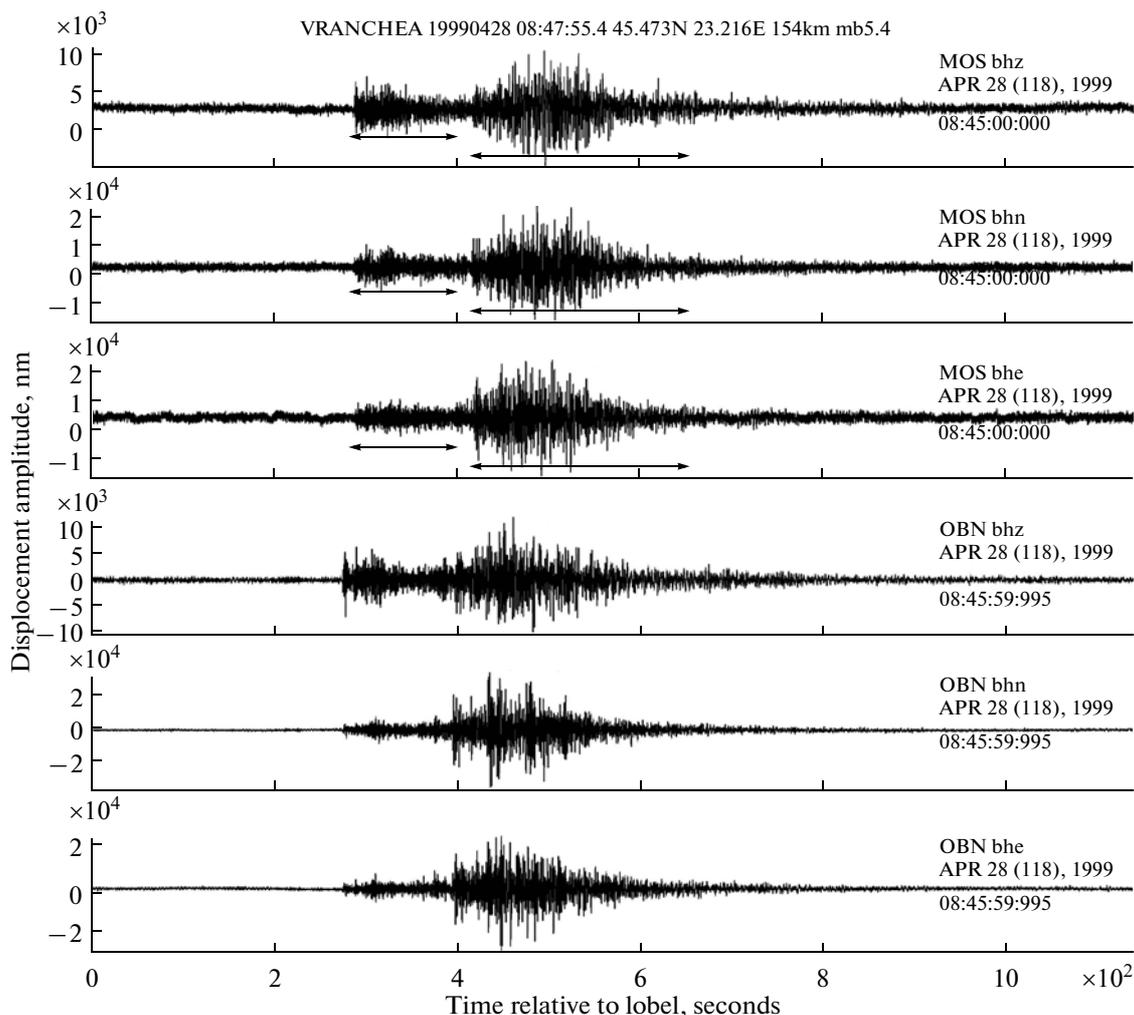


Рис. 9. Пример записей Вранчского землетрясения 28 апреля 1999 г. с $M_w = 5.4$ сейсмическими станциями “Москва” (вверху) и “Обнинск” (с разрешения Геофизической службы РАН). Двойными стрелками помечены группы волн P и S + L, подвергнутых анализу.

бытию с $M_w = 8.0$ соответствуют ускорения 2.3 см/с^2 – в первом случае и 1.7 см/с^2 – во втором.

Исследования с иным подходом к расчетам ожидаемого сейсмического эффекта, выполненные А.А. Гусевым и О.В. Павленко, также показали, что

для землетрясения с магнитудой $M_w = 8.0$ в зоне Вранча ускорения сотрясений на территории Москвы лишь немногим превысят 2 см/с^2 .

Все эти относительно невысокие оценки ускорений при ощутимых проявлениях в Москве Вранч-

Таблица 3. Основные параметры сейсмического эффекта Вранчских землетрясений

Дата	H , км	M_w	X , км	A_Z , см/с^2	A_{EW} , см/с^2	A_{NS} , см/с^2	A_{hor} , см/с^2
1977 г., 4 марта	108	7.4	1338	—	—	—	(1.0)
1986 г., 30 августа	137	7.1	1382	0.08	—	—	0.312
1999 г., 28 апреля	156	5.4	1365	0.005	0.018	0.018	0.025
2001 г., 24 мая	129	5.3	1335	0.007	0.014	0.017	0.022
2004 г., 27 октября	96	5.9	1317	0.022	0.063	0.059	0.086
2005 г., 18 июня	139	5.0	1321	0.004	0.007	0.005	0.009
Прогноз (2100 ?)	150	8.0	1350	0.8	2.3	2.2	2.3

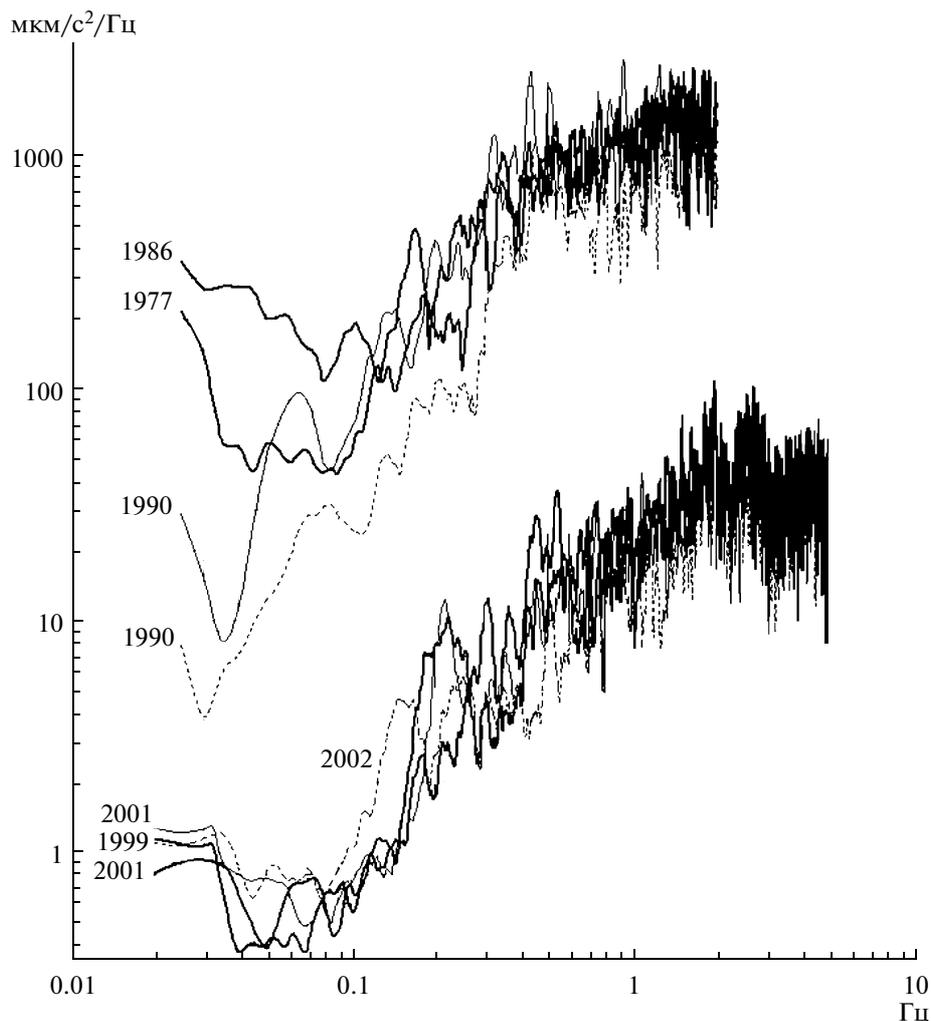


Рис. 10. Спектральная плотность ускорений движений грунта в волнах Р под сейсмостанцией “Москва”. Цифрами указаны даты землетрясений в зоне Вранча.

ских землетрясений, вызвавшие сомнения проектировщиков и некоторых сейсмологов, в первом приближении можно пояснить, анализируя рис. 14, составленный с использованием данных из работы [Wald et al., 1999]. Как видно, хотя и наблюдается достаточно большой (до одного десятичного порядка) разброс наблюдаемых величин ускорений при сейсмической интенсивности $I = 5$ баллов и более, но эти данные доступны для систематизации и численного анализа, что и сделано в [Wald et al., 1999]. Параметры же сейсмических событий малой интенсивности (менее 5 баллов) и небольших ускорений (до 10 см/с^2), которых явно еще недостаточно, пока остаются не систематизированными (левый нижний угол рис. 14). Вместе с тем проявление разброса тех и других величин могут указывать на правомерность полученных нами, казалось бы заниженных, значений пиковых ускорений $\text{PGA} = 2.3 \text{ см/с}^2$ при ощутимых сейсмических сотрясениях интенсивностью до 5 баллов.

Здесь же пунктиром нами показана аппроксимация и условная экстраполяция в сторону малой сейсмической интенсивности величин ускорений 100, 200 и 400 см/с^2 , рекомендованных СНиП II-7-81* в качестве минимальных для 7, 8 и 9 баллов шкалы MSK-64. Уместно также заметить, что более надежным критерием оценки сейсмической опасности, по мнению многих исследователей, является векторная скорость колебаний грунта у оснований строительных объектов. Наблюдения показали, что по сравнению со всеми другими параметрами сейсмических волн (смещения, ускорения и др.), скорость смещений лучше всего коррелирует со степенью повреждений зданий.

На нередко обнаруживаемые несоответствия инструментальных и макросейсмических данных, а также на необходимость учета влияния на сейсмический эффект длительности колебаний, указывается многими исследователями [Аптикаев, 1999;

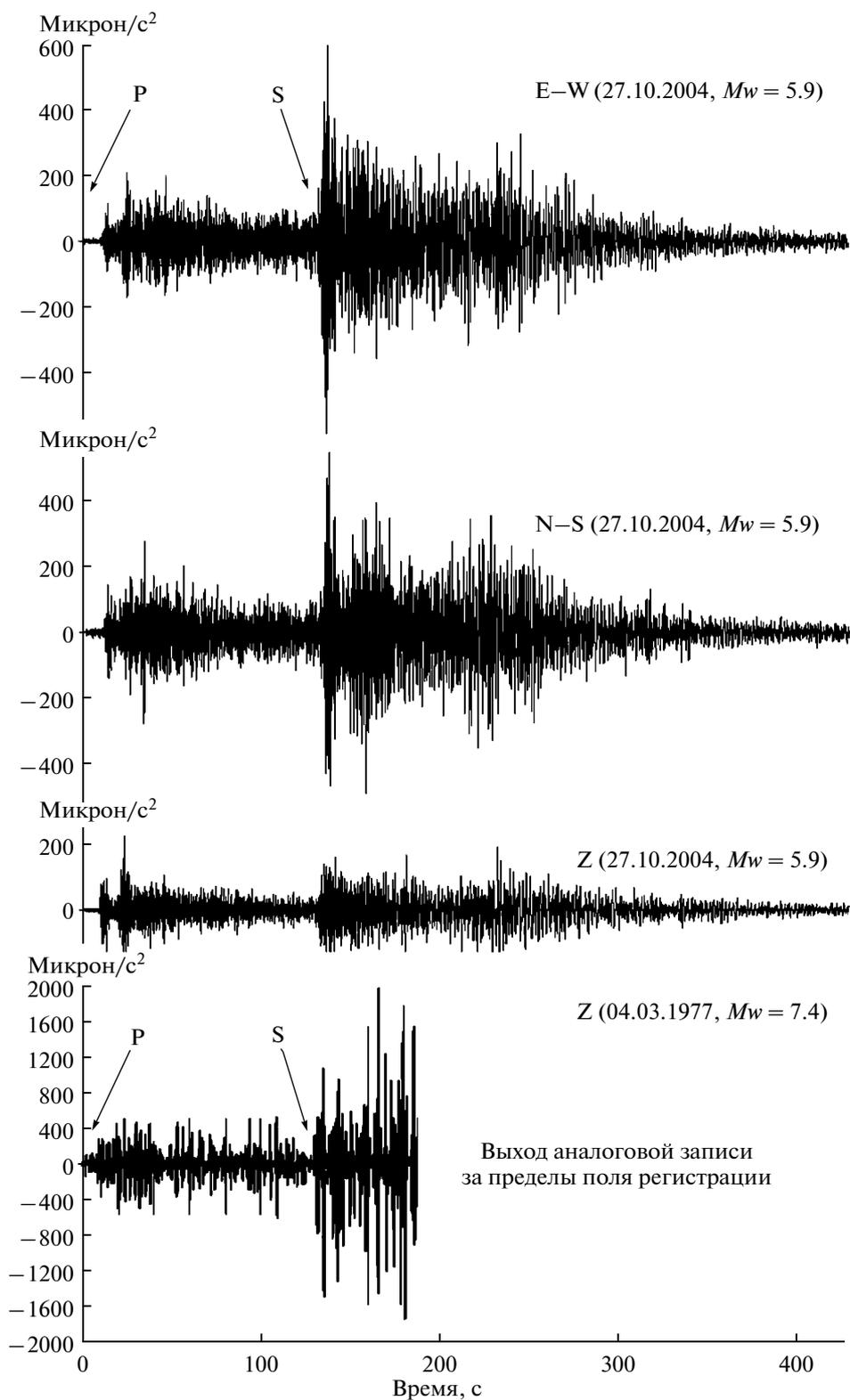


Рис. 11. Цифровая трехкомпонентная акселерограмма движений грунта под сейсмостанцией “Москва” во время Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (магнитуда $M_w = 5.9$) и фрагмент не полностью оцифрованной вертикальной составляющей акселерограммы землетрясения 4 марта 1977 г. с $M_w = 7.4$ (внизу). Указаны моменты вступления на сейсмостанцию “Москва” продольных (P) и поперечных (S) сейсмических волн.

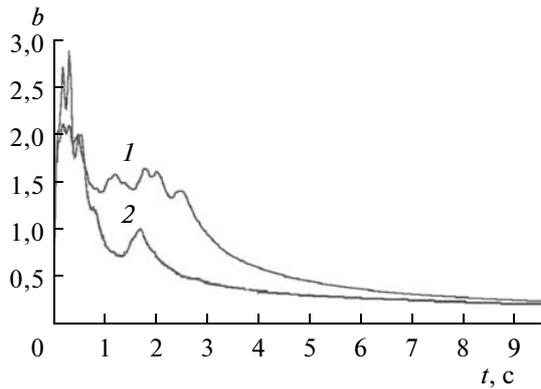


Рис. 12. Графики коэффициентов динамичности, составленные по вертикальной составляющей акселерограммы Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (1) и по ее фрагменту (2), эквивалентному по времени имеющейся части записи землетрясения 1977 г. (см. рис. 11). Отчетливо видна потеря низкочастотной составляющей сейсмических колебаний.

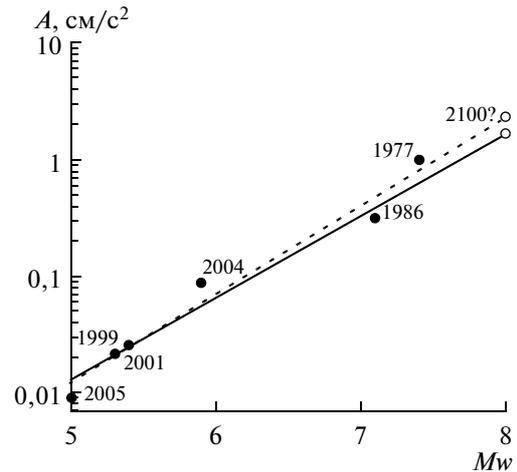


Рис. 13. Зависимость максимальных горизонтальных ускорений A (cm/s^2) перемещений грунта под сейсмостанцией “Москва” от магнитуды M_w землетрясений в зоне Вранча. Пояснения в тексте.

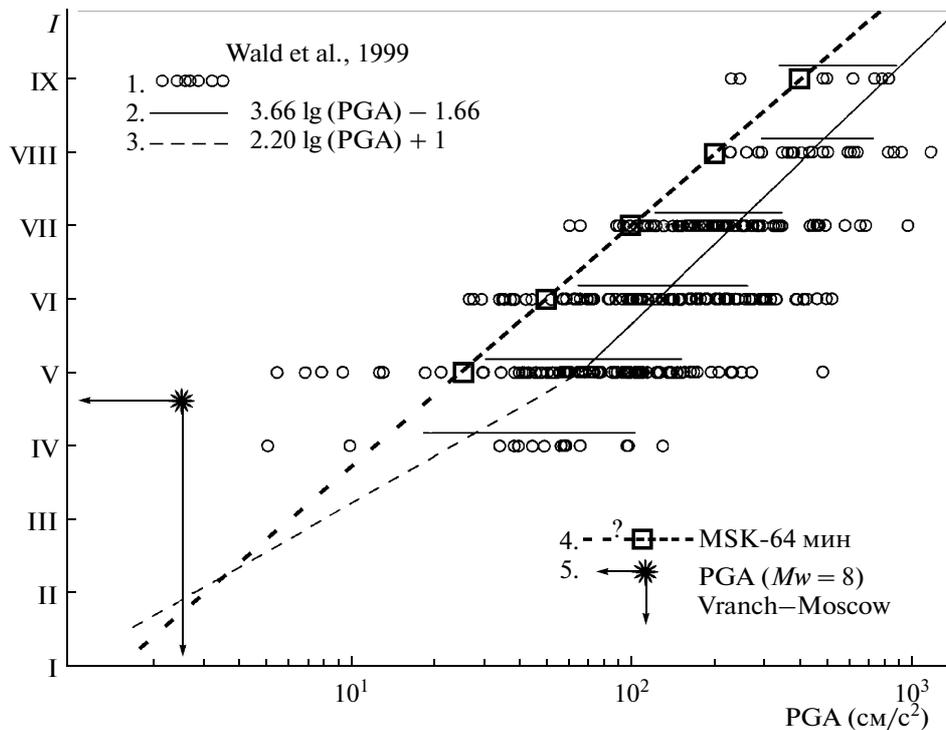


Рис. 14. Соотношения величин сейсмической интенсивности (I , баллы) и пиковых ускорений (PGA); 1–3, по данным [Wald et al., 1999]; 4 – нижний предел значений ускорений по шкале MSK-64, согласно СНиП II-7-81*; 5 – оценка соотношения I и PGA для грунта под сейсмостанцией “Москва” при проектном землетрясении с $M_w = 8.0$ в зоне Вранча.

Wald et al., 1999; Аптикаев, Эртелева, 2002; Уломов, 2008 и др.].

В заключение этого раздела, принимая за основу высококачественную запись сейсмостанцией “Москва” достаточно крупного Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. с $M_w = 5.9$, можно рассчитать синтезированную акселерограмму для

грунтов 2-й категории г. Москвы в случае возникновения максимального возможного землетрясения с $M_w = 8.0$ в зоне Вранча. Ее можно получить умножая цифровую запись ускорений при событии 2004 г. (см. рис. 11) на коэффициент, определяемый из соотношения максимальной прогнозируемой величины $A_{\text{пор}} = 2.3 \text{ cm/s}^2$ и максимальной ампли-

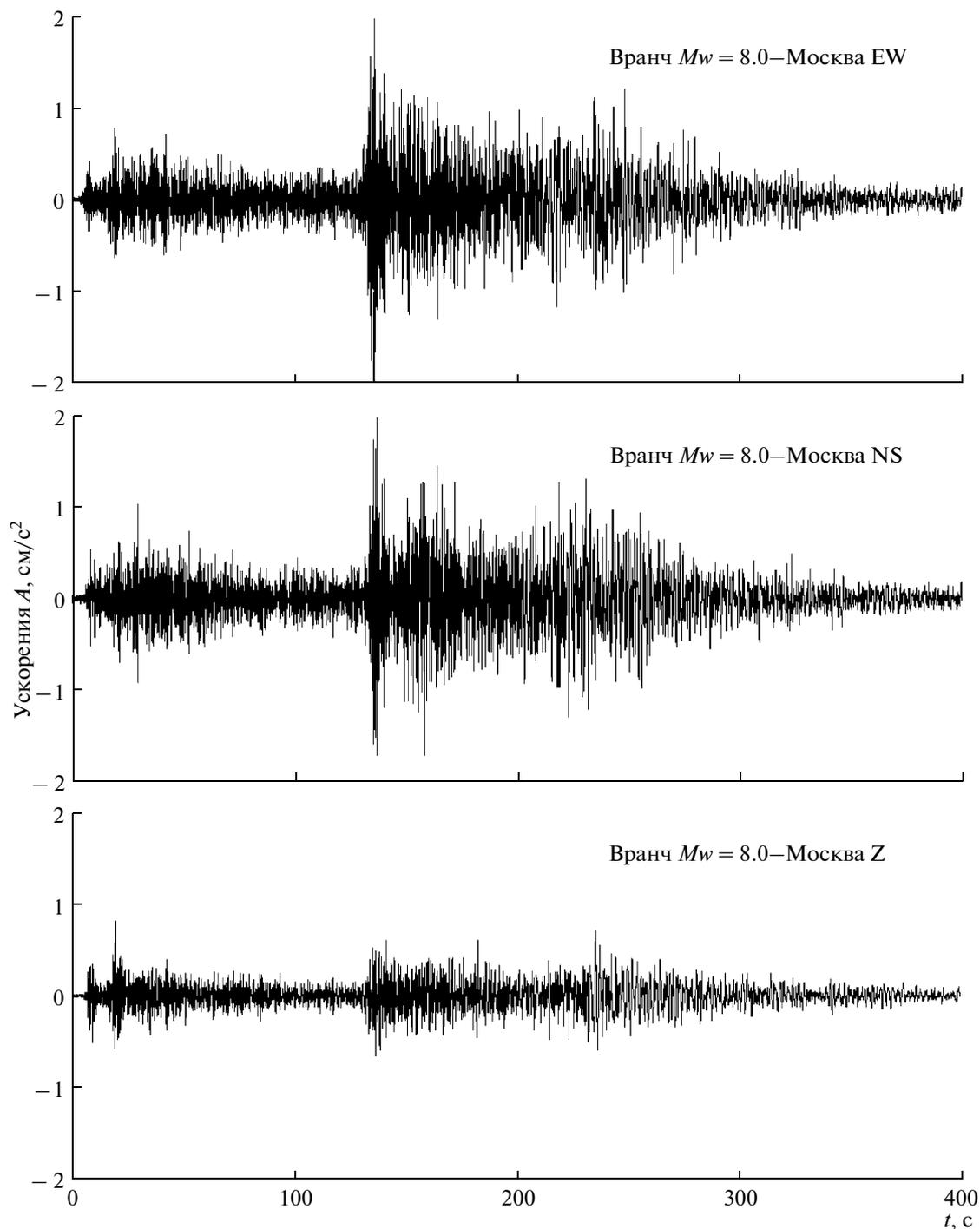


Рис. 15. Синтезированная трехкомпонентная акселерограмма для эталонного грунта под сейсмостанцией “Москва” при максимальном возможном Вранчском землетрясении с $M_w = 8.0$.

туды ускорений $A_{EW} = 0.063 \text{ см/с}^2$, зарегистрированных на горизонтальной составляющей в 2004 г. Этот коэффициент оказался равным 37. Полученная таким образом синтезированная акселерограмма представлена в трех проекциях (EW, NS, Z) на рис. 15.

Рис. 16 иллюстрирует траекторию горизонтальных ускорений, построенную путем векторного сложения цифровых записей двух горизонтальных компонент EW и NS. Как видно, максимальная амплитуда горизонтальных ускорений близка к величине $A_{гор} = 2.3 \text{ см/с}^2$ и имеет широтную ориента-

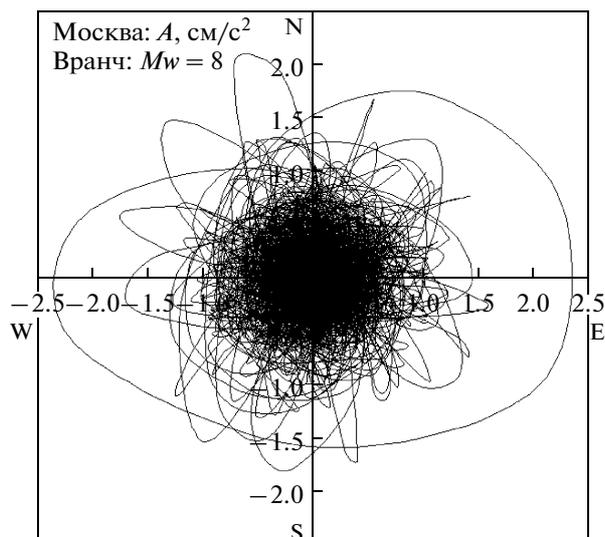


Рис. 16. Траектория горизонтальных ускорений перемещений грунта под сейсмостанцией “Москва”, полученная путем векторного сложения цифровых записей двух горизонтальных компонент – север-юг и восток-запад синтезированной акселерограммы при Вранчском землетрясении с $M_w = 8.0$.

цию, а не направление на очаг землетрясения в зоне Вранча, расположенный к юго-западу от Москвы.

Таким образом, траектории перемещений грунта при Вранчских землетрясениях гораздо сложнее и многомернее, а не поляризована строго по направлению на источник сотрясений, как это обычно предполагается проектировщиками при расчетах динамических нагрузок на здания и сооружения.

7. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Согласно нормативным картам Общего сейсмического районирования Российской Федерации – ОСР-97, территория г. Москвы расположена в 5-балльной сейсмической зоне. Наибольшую опасность для высотных зданий в г. Москве представляют низкочастотные колебания от заглубленных очагов сильных землетрясений, происходящих в Восточных Карпатах (зона Вранча, Румыния), удаленных от г. Москвы на расстояние около 1350 км. Магнитуда максимальных возможных землетрясений в зоне Вранча может достигать $M_w = 8.0$, а период их повторяемости составлять 300–500 лет.

На основе анализа записей сейсмической станцией “Москва” землетрясений разных магнитуд (в интервале от $M_w = 5.0$ до $M_w = 7.4$) из зоны Вранча определены ускорения колебаний грунта под этой сейсмостанцией, принятого за эталонный. Путем экстраполяции параметров слабых землетрясений в сторону сильных сейсмических событий оценены максимальные горизонтальные ускорения $A_{hor} = 2.3 \text{ см/с}^2$, ожидаемые на эталонном

грунте при землетрясении с магнитудой $M_w = 8.0$ в зоне Вранча.

Рассчитана модельная (синтезированная) акселерограмма для эталонного грунта на территории г. Москвы при наиболее крупном землетрясении ($M_w = 8.0$) в зоне Вранча. Показано, что максимальные перемещения грунта гораздо сложнее предполагавшихся ранее и не ориентированы строго по направлению на сейсмический источник, как это обычно принимается проектировщиками при расчете на сейсмостойкость зданий и сооружений.

Выполненные исследования свидетельствуют о необходимости корректировки макросейсмической шкалы MSK-64 и уточнения строительных норм – СНиП III -7-81* в части оценки низкочастотных сейсмических воздействий интенсивностью 5 баллов и менее, в том числе от удаленных землетрясений.

Автор благодарен Н.Д. Павловой (зав. ЦСС “Москва”), И.П. Габсатаровой и В.Ф. Бабкиной (Геофизическая служба РАН, г. Обнинск) за предоставление сейсмографического материала и помощь в его предварительной обработке, а также Н.С. Медведевой (ИФЗ РАН) за активное участие в выполненных исследованиях. С искренней теплотой и великой благодарностью автор вспоминает тесное сотрудничество с ушедшими уже из жизни И.В. Горбуновой, Л.С. Шумиловой и В.Д. Феофилактовым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антикаев Ф.Ф.* Проблемы создания сейсмической шкалы нового поколения // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 23–28.
- Антикаев Ф.Ф., Эртелева О.О.* Генерирование искусственных акселерограмм методом масштабирования реальных акселерограмм // Физика Земли. № 7. 2002. С. 39–45.
- Временные рекомендации по назначению нагрузок и воздействий на многофункциональные высотные здания и комплексы в Москве – МДС 20-1 2006. ФГУП “Научно-исследовательский центр “Строительство”. М. 2006.
- Гусев А.А., Шумилова Л.С.* Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 29–40.
- Друмя А.В., Степаненко Н.Я., Симонова Н.А.* Сильнейшие землетрясения Карпатского региона в XVIII–XX веке // Buletinul Institutului de Geofizica si Geologie al ASM. № 1. 2006. С. 37–64.
- Москва: геология и город / гл. ред. В.И. Осипов, О.П. Медведев. М.: АО “Московские учебники и Картография”. 1997. 400 с.
- Сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Карта М. 18000000 на 4-х листах / Гл. ред. Страхов В.Н. и Уломов В.И. М.: ОИФЗ–РОСКАРТОГРАФИЯ. 2000.

СНиП II-7-81*. Строительство в сейсмических районах. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП. 2000. 44 с. Прил. 10 карт.

Уломов В.И. Низкочастотные сейсмические воздействия на высотные здания в г. Москве от далеких очагов сильных землетрясений. Труды 5-й Международной конференции—выставки “Современные системы и средства комплексной безопасности и противопожарной защиты объектов строительства”, 21–22 ноября 2007 г. М.: Центр новых строительных технологий, материалов и оборудования Москомархитектуры. 2007. 8 с.

Уломов В.И. О сейсмических воздействиях на высотные здания и сооружения г. Москвы // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. № 2 (109). 2008.

Уломов В.И., Шумилина Л.С. Проблемы сейсмического районирования территории России. Всероссийский НИИ проблем научно-технического прогресса и ин-

формации в строительстве. М.: ВНИИТПИ Госстроя России. 1999а. 56 с.

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. 1999б. 57 с.

Уломов В.И., Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Оценка сейсмической опасности для высотных зданий в г. Москве. Современное высотное строительство. Монография (464 с.). М.: ГУП “ИТЦ Москомархитектуры”. 2007. С. 94–100.

Wald D.J., Quitoriano V., Heaton T.H., Kanamori H. Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity for Earthquakes in California, Earthquake Spectra. 1999. V. 15. № 3. 557–564.