

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ В г. МОСКВЕ

В 1991–1997 гг. в Лаборатории континентальной сейсмичности (ЛКС) Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ) РАН были созданы нормативные карты общего сейсмического районирования территории РФ – ОСР-97, вошедшие с 2000 г. в новую редакцию СНиП П-7-81* «Строительство в сейсмических районах» [1-3]. В 2003–2004 гг., в связи с проектированием и строительством в г. Москве высотных зданий, в ЛКС выполнены исследования по прогнозу сейсмических воздействий на такие сооружения от заглубленных очагов сильных землетрясений в Восточных Карпатах (зона Вранча). Были также проведены инструментальные наблюдения техногенных сейсмических процессов на одном из участков Третьего транспортного кольца [5]. С целью получения информации о влиянии различных инженерно-геологических условий на характер колебаний при Вранчских землетрясениях в Институте геоэкологии РАН были выполнены расчёты для ряда типичных геологических разрезов на территории г. Москвы [6]. Результаты этих работ получили отражение в нормативном документе [4].

Сейсмические сотрясения на территории г. Москвы

Москва традиционно считалась сейсмически безопасным районом. Ни в летописях, ни в литературных источниках нет сообщений ни об одном местном землетрясении. Есть лишь упоминание о колебаниях в 1230 г. во «владимирской земле» (а значит, и на территории будущей Москвы). Интенсивность их оценена в 5 баллов по современной 12-балльной макро-сейсмической шкале MSK-64. Центральная сейсмическая станция (ЦСС) «Москва», действующая в городе с середины 30-х годов прошлого века, не зарегистрировала ни одного землетрясения, очаг которого располагался бы в пределах города и

его окрестностей. Самые близкие к г. Москве эпицентры слабых и умеренных землетрясений находились в Рязанской, Тверской и Кировской областях.

Вместе с тем определенную угрозу высотным зданиям на территории г. Москвы представляют ощутимые низкочастотные колебания, вызванные прохождением сейсмических волн от крупных землетрясений, возникающих на глубинах 80–200 км в Восточных Карпатах, в районе Вранча, расположенном на территории Румынии севернее г. Бухареста, на расстоянии около 1400 км от г. Москвы (рис. 1) [7–9]. Огромные размеры площадей сейсмических сотрясений обусловлены большой глубиной залегания очагов Вранчских землетрясений (обычная глубина внутриконтинентальных очагов не превышает 25–30 км).

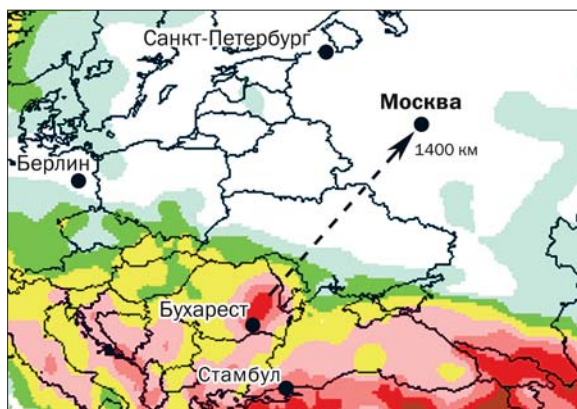


Рис. 1. Очаговая область Вранчских землетрясений расположена севернее г. Бухареста.

Белый цвет обозначает максимальную интенсивность до 5-ти бал.; голубой — 5–6-ти, зеленый — 6–7-ми, желтый — 7-ми, розовый — 8-ми, красный — 9-ти и коричневый — 9–10-ти бал. Стрелка — направление распространения сейсмических волн от Вранча до г. Москвы.

Таблица 1
Основные параметры относительно недавних
Вранчских землетрясений.

Дата землетрясения	Глубина очага, км	Магнитуда (по шкале Рихтера) <i>M</i>
1977 / 4 марта	108	7,4
1986 / 30 августа	132	7,1
1990 / 30 мая	89	6,7
1990 / 31 мая	88	6,1
1999 / 28 апреля	154	5,4
2001 / 24 мая	144	5,2
2001 / 20 июня	125	5,2
2002 / 30 ноября	162	5,1

В табл. 1 приведены основные параметры наиболее крупных Вранчских землетрясений, ощущавшихся в последние 30 лет. Из ранних и более сильных известны землетрясения 23 октября 1802 г. и 10 ноября 1940 г. Вранчские землетрясения 1977 г. и 1986 г. ощущались в г. Москве на уровне первых этажей интенсивностью до 4-х баллов. На 14–18-х этажах зданий башенного типа интенсивность колебаний достигала 6-ти, а в отдельных случаях даже 7-ми баллов, сопровождаясь повреждениями в виде небольших трещин на стыке стен и потолков. Менее крупными Вранчскими землетрясениями, во время которых интенсивность колебаний верхних этажей высоких зданий в г. Москве не превышала 3–4-х баллов, были землетрясения 30 и 31 мая 1990 г. Сейсмические события 1999–2002 гг. зарегистрированы лишь аппаратурой ЦСС «Москва».

Прогноз сейсмической опасности и приемлемый риск

Условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, делают актуальным вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. Иными словами, риск всегда будет иметь место, но он должен быть оценён и сведен к минимуму. Такая концепция и заложена в комплекте новых карт общего сейсмического районирования территории РФ – ОСР-97 (А, В, С). Карты позволяют оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных категорий ответственности и сроков службы на трех вероятностных уровнях сейсмического риска, отражающих расчётную интенсивность сейсмических сотрясений, ожидаемых на конкретной площадке с заданной вероятностью и в течение определенного интервала времени. Карта ОСР-97А соответствует 10%-ному риску возможного превышения указанных на ней величин сейсмической интенсивности в течение 50 лет и применяется при массовом строительстве жилых, общественных и производственных зданий; карты ОСР-97В и ОСР-97С, соответствующие 5%- и 1%-ному риску, предназначены

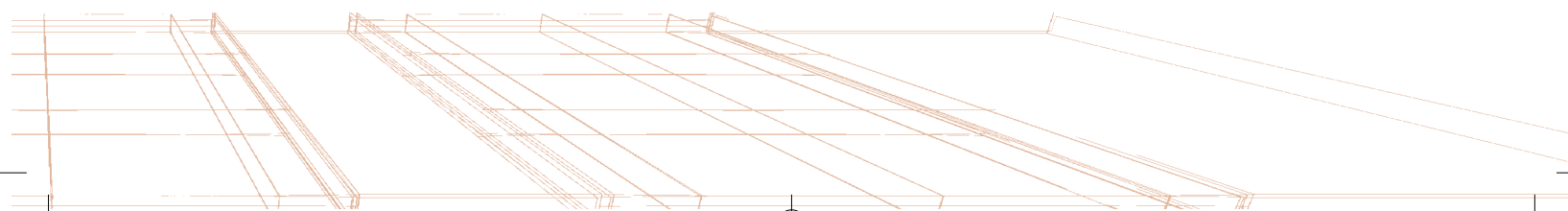
для проектирования и строительства объектов повышенной ответственности, в том числе высотных зданий. Для оценки сейсмической опасности мест размещения атомных станций и других объектов ядерного комплекса создана карта ОСР-97D, лимитирующая среднегодовой риск вероятностью 10^{-4} и используемая нормативными документами Минатома России.

Согласно даже самой «суровой» карте ОСР-97D г. Москва расположена в зоне возможных 5-балльных сейсмических сотрясений, отнесенных к средним грунтам (грунты II категории, по СНиП II-7-81*), с чрезвычайно низким риском возможного превышения такой интенсивности. Ближайшая к Москве 6-балльная зона удалена от центра города на расстояние около 120 км и частично захватывает лишь восточную часть Московской области. Анализ сейсмической опасности показывает, что на территории г. Москвы даже при максимальных возможных Вранчских землетрясениях с магнитудой $M=7,5-8,0$ (по Рихтеру) и для чрезвычайно большого интервала времени (порядка 10 тыс. лет) сейсмический эффект на грунтах II категории не должен превышать 5-ти баллов. Определенные приращения балльности возможны на участках, сложенных более слабыми (рыхлыми) и обводненными грунтами.

Спектральный состав сейсмических колебаний

Спектральный анализ сейсмических колебаний, достигающих г. Москвы при Вранчских землетрясениях, необходим для корректировки высотного строительства с учетом резонансных характеристик проектируемых многоэтажных сооружений и их реакции на сейсмические воздействия. Обработка цифровых сейсмограмм ЦСС «Москва», появившихся в последние годы, открывает новые возможности для решения таких задач. Для вычисления амплитудных спектров использовалась стандартная методика быстрого преобразования Фурье. Спектральные плотности после введения поправок на амплитудно-частотные характеристики сейсмографов представлены для спектров смещений грунта в единицах мкм/Гц (микрон на герц).

На рис. 2 приведены записи смещений, скоростей и ускорений колебаний грунта на территории г. Москвы при Вранчском землетрясении 30 августа 1986 г. с магнитудой $M = 7,1$. Рис. 3 иллюстрирует графики спектральной плотности ускорений движений грунта (вертикальная компонента поперечных $S_{\text{волн}}$) при наиболее сильных и ощутимых в г. Москве Вранчских землетрясениях 1977, 1986 и 1990 (2 события) гг., а также при относительно слабых и зарегистрированных лишь сейсмографами землетрясениях 1999, 2001 (2 события) и 2002 гг.



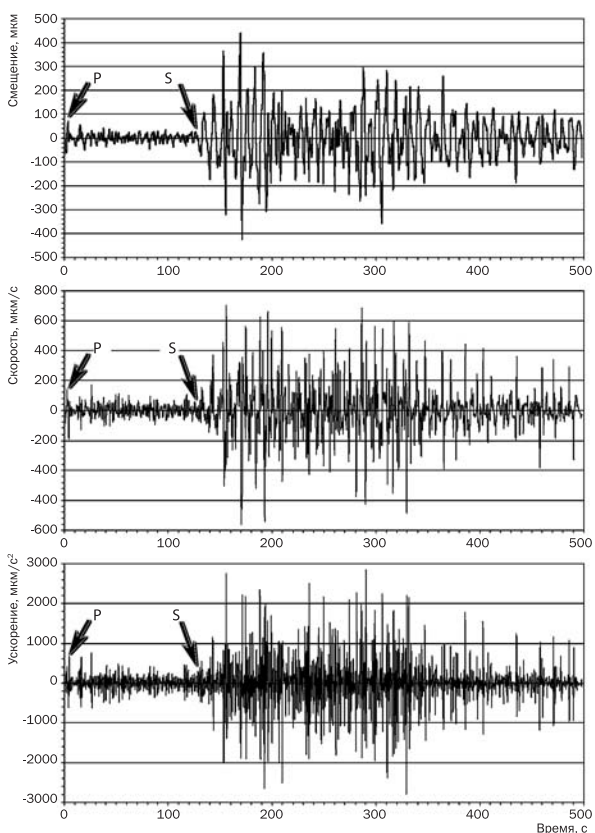


Рис. 2. Записи смещений, скоростей и ускорений при землетрясении 30 августа 1986 г. в зоне Вранча с магнитудой $M=7,1$. Стрелки — моменты вступления продольных (P) и поперечных (S) волн.

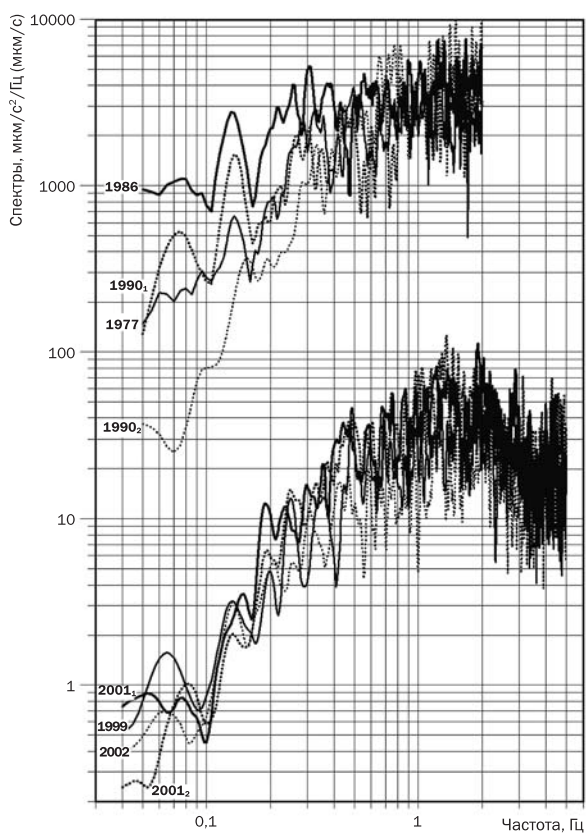


Рис. 3. Спектральная плотность ускорений движущейся вертикальной компоненты S-волн на территории г. Москвы. Цифрами указаны годы землетрясений.

Поскольку при сильных землетрясениях удалось представить в цифре лишь вертикальные компоненты аналоговых сейсмограмм, сравнение сильных и слабых сейсмических сотрясений оказалось возможным только для этой составляющей.

Обращает на себя внимание, что для всех землетрясений, сильных и слабых, периоды преобладающих значений спектральной плотности находятся в интервале от 0,4 до 10 с. Максимальные колебания наблюдаются в интервале периодов от 0,4 до 3–4 с. Более того, все кривые по конфигурации сходны между собой независимо от рассматриваемого интервала магнитуд — от $M=5,1$ до $M=7,4$. При этом спектры землетрясений небольших магнитуд незначительно различаются по амплитудам как в продольных волнах P, так и в волнах S, в то время как у сильных землетрясений компонента S-волн существенно (примерно в 3 раза) превалирует над волнами P и в пиковых значениях достигает 1 см/с, что соответствует 4-м баллам по шкале MSK-64. Все эти и другие явления делают актуальным всестороннее изучение современных цифровых записей на территории г. Москвы даже от слабых Вранчских землетрясений и открывают новые возможности для получе-

ния адекватных инженерных решений. Путем простой фильтрации легко обнаружить интенсивную низкочастотную составляющую сейсмических колебаний на территории г. Москвы, особенно опасную для высотных объектов (рис. 4). Небезынтересно изучение и многомерных сейсмических воздействий на здания и сооружения (рис. 5).

Сейсмические воздействия на территории г. Москвы

Акселерограмма, изображенная на рис. 6 и помещенная в [4] (где ошибочно сказано, что она получена на ЦСС «Москва», а не на одной из АЭС, удаленной от района Вранча, примерно, на такое же расстояние), а также акселерограмма землетрясения 30 августа 1986 г., приведенная в верхней части рис. 3, использовались в качестве входного сигнала при расчётах акселерограмм по программе NERA [10]. На рис. 7 показан спектр Фурье этой акселерограммы. Видно, что в спектре преобладают сравнительно низкие частоты (в диапазоне от 0,5 Гц до 3–4 Гц), соответствующие записям в г. Москве при сильных и слабых землетрясениях из зоны Вранча (максимальные

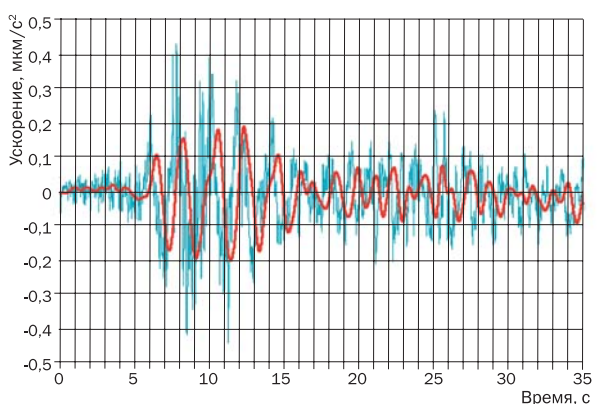


Рис. 4. Горизонтальная составляющая ускорений на территории г. Москвы при землетрясении 4 марта 1977 г. в зоне Вранча и ее низкочастотная составляющая (красная кривая) с периодом 2,0–2,5 с.

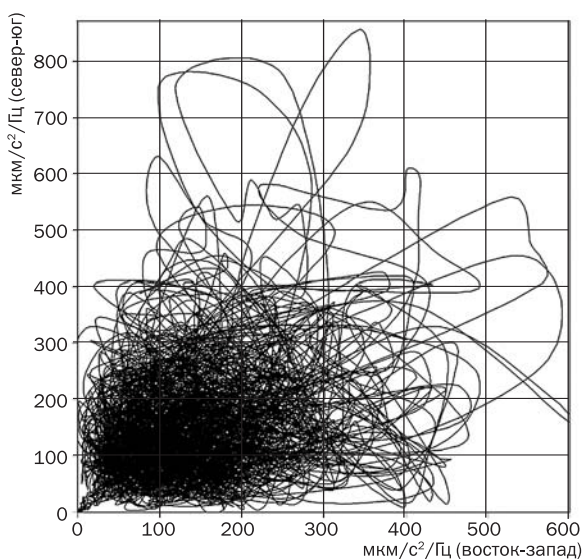


Рис. 5. Траектория движения земной поверхности в горизонтальной плоскости на территории г. Москвы при Вранчском землетрясении 28 апреля 1999 г.

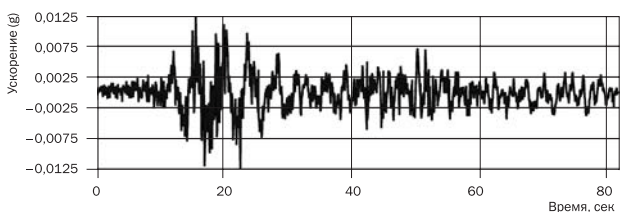


Рис. 6. Акселерограмма землетрясения 4 марта 1977 г. из зоны Вранча (горизонтальная компонента X), масштабированная на уровень кристаллического фундамента с $a_{\max}=0,0125g$.

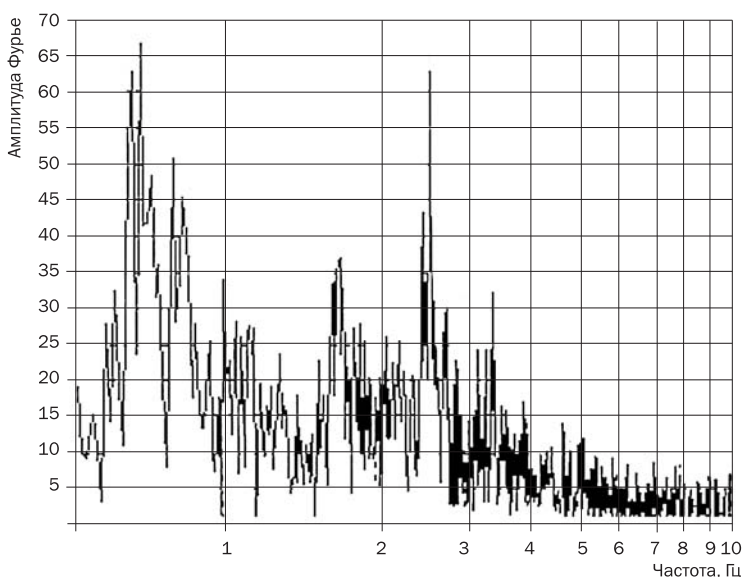


Рис. 7. Спектр Фурье акселерограммы Вранчского землетрясения 4 марта 1977 г. на территории г. Москвы (горизонтальная компонента X).

ускорения наблюдались в интервале периодов от 0,4 до 3–4 с, что соответствует частотному диапазону от 0,3 Гц до 2,5 Гц).

Максимальные ускорения на горизонтальных составляющих восток-запад (E-W) и север-юг (N-S) при 5-балльных сотрясениях на грунтах II категории оценены согласно MSK-64 как 25 см/с^2 (0,0125 в долях g). Эта величина может несколько изменяться в ту и другую стороны в зависимости от конкретной инженерно-геологической обстановки. Сейсмические характеристики слоев (мощность, скорость поперечных волн и др.) были определены до глубины 70–100 м. Как показали расчёты, основное влияние на уровень ускорений оказывает мощность четвертичных и юрских (сравнительно низкоскоростных) пород, залегающих на известняках каменноугольного возраста [6]. Аналогичные величины ускорений были получены и при использовании в качестве входного сигнала синтезированных акселерограмм, созданных по программе ЦНИИСК и имевших в качестве входных параметров максимальное ускорение $a_{\max}=12,5 \text{ см/с}^2$, преобладающий период $T_{\max}=1,0 \text{ с}$ и эффективную длительность колебаний 90 с. Эти акселерограммы моделируют фрагмент наиболее интенсивных колебаний, соответствующий приходу поперечных и поверхностных волн от Вранчских землетрясений. Результаты оценки максимальных ускорений и приращений сейсмической интенсивности относительно исходной 5-балльной на конкретных участках с различными инженерно-геологическими условиями на территории г. Москвы сведены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка максимальных ускорений и приращений сейсмической интенсивности на различных по инженерно-геологическим свойствам грунтах разрезах на территории г. Москвы.

№ разреза	Местоположение	Мощность толщи четвертичных и юрских пород, м	Максимальное ускорение, см/с ²	Приращение сейсмической интенсивности ΔI , балл
1	Рублёвское ш. (район Кардиоцентра)	76	61	+1,0
2	3-е транспортное кольцо (между Хорошевским и Волоколамским ш.)	40	30	0
3	Ходынское Поле	31	25	-0,26
4	Софийская наб.	19	30	0
5	Мясницкая ул.	18	24	-0,32
6	Серебряническая наб.	5	17	-0,81

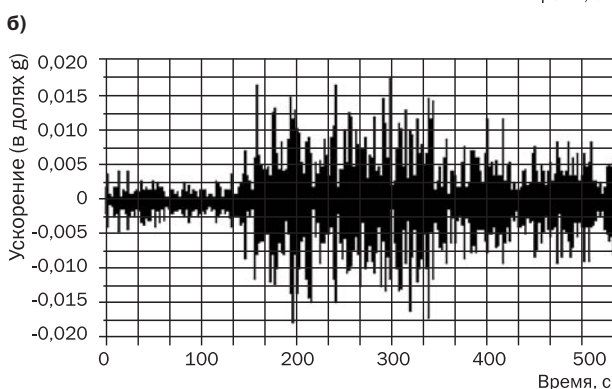
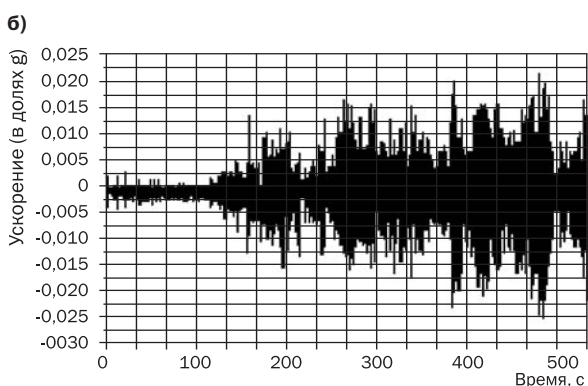
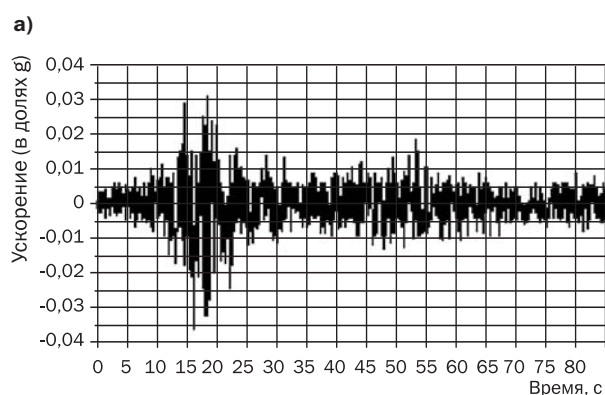
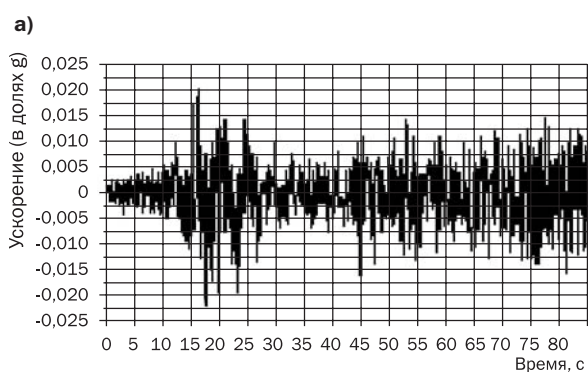


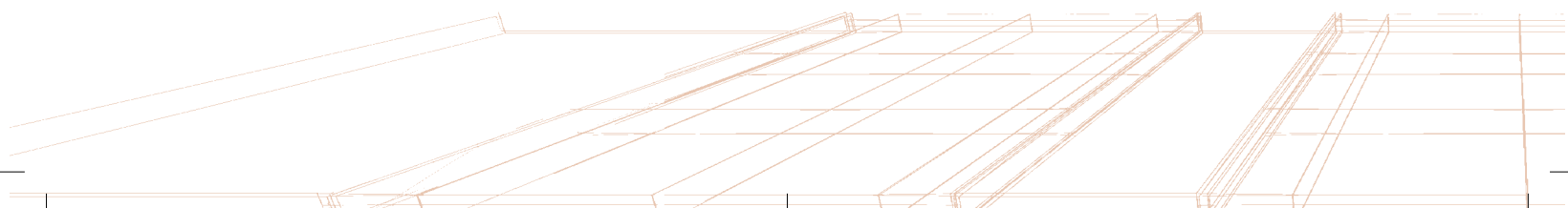
Рис. 8. Акселерограммы сценарного Вранчского землетрясения на площадке «Москва-Сити», рассчитанные с учётом местных грунтовых условий: а — составляющая X при землетрясении 4 марта 1977 г.; б — составляющая Z при землетрясении 30 августа 1986 г.

Рис. 9. Акселерограммы сценарного Вранчского землетрясения на площадке проектируемого строительства здания (высотой 130 м) на Ленинградском ш. с теми же входными параметрами, как и на рис. 8.

Результаты расчёта акселерограмм от сценарного (моделируемого) Вранчского землетрясения с входным сигналом в виде акселерограмм землетрясений 4 марта 1977 г. и 30 августа 1986 г. приведены на рис. 8. Как видно, при различных входных сигналах и различной длительности, значения a_{\max} оказались практически одинаковыми (соответственно, 0,022g и 0,023g).

Получена оценка сейсмических воздействий на площадке строительства 2-ой очереди ЦМТ на Крас-

нопресненской наб. («ЦМТ-2»), где планируется строительство 30-этажного здания и 20-этажной гостиницы высотой более 100 м, а также подземных частей, заглублённых на 10 м от земной поверхности. Расчёты показали, что на основной площадке «ЦМТ-2» для горизонтальной составляющей (входной сигнал — акселерограмма 4 марта 1977 г.) и для вертикальной составляющей (входной сигнал — акселерограмма 30 августа 1986 г.) значения максимальных ускорений составили соответственно 0,032g и



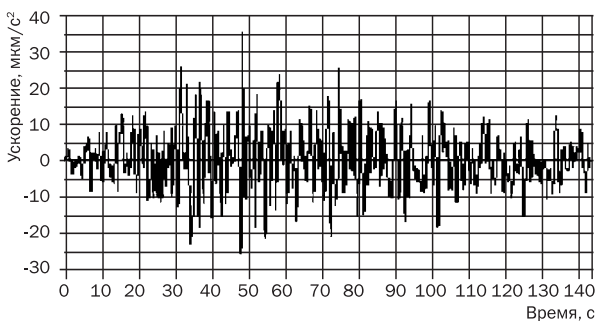


Рис. 10. Синтезированная акселерограмма (горизонтальная составляющая) сценарного Вранчского землетрясения на площадке строительства здания на Ленинградском ш. г. Москвы.

0,028g. На площадке проектируемого офисно-торгового Центра высотой 130 м на Ленинградском ш., в отличие от двух предыдущих примеров, известняки залегают на значительно большей глубине и перекрыты песками четвертичного и мелового возраста, а также юрскими глинами общей мощностью 53 м. Результаты расчётов горизонтальной X и вертикальной Z составляющих колебаний с различными входными сигналами приведены на рис. 9, где видно, что на составляющей X значение a_{\max} вдвое больше, чем на составляющей Z (соответственно, 0,035g и 0,017g).

Как показывают расчёты, при значительных заглублениях подземных частей высотных зданий (более 10–20 м от поверхности), а также в зависимости от литологического состава толщи грунтов ниже уровня заглубления, амплитуда ускорений уменьшается на 30–80% относительно амплитудного уровня на поверхности. На рис. 10 приведена синтезированная акселерограмма, моделирующая колебания от возможного Вранчского землетрясения с интенсивностью 5,5 баллов на территории г. Москвы. Рис. 11 иллюстрирует спектры реакции, рассчитанные по синтезированной акселерограмме и по программе NERA с входным сигналом в виде акселерограммы землетрясения 30 августа 1986 г., приведённой к горизонтальным составляющим путём увеличения амплитуд вдвое ($a_{\max}=35 \text{ см/с}^2$). Спектры реакции, рассчитанные по синтезированной и расчётной акселерограммам с затуханием осциллятора 5% от критического очень близки как по форме, так и по уровню ускорений в диапазоне периодов от 0,5 до 4 с. Следовательно, для определения количественных характеристик сейсмических воздействий на конкретных площадках высотного строительства можно использовать как расчётные акселерограммы с учётом местных условий, так и синтезированные, сформированные на основе моделирования процессов распространения сейсмических волн через конкретную грунтовую толщу.

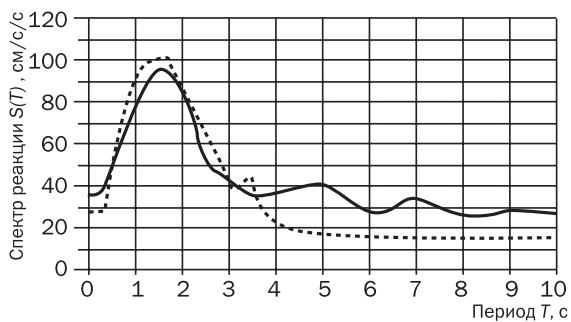


Рис. 11. Спектры реакции: вычисленные по расчётной (рис. 9, б) акселерограмме — кривая 1 и синтезированной (рис. 10) — кривая 2.

Заключая изложенное, сделаем три основных вывода.

1. Наибольшую опасность для высотных зданий и сооружений в г. Москве представляют низкочастотные колебания, вызываемые сильными землетрясениями Вранчской очаговой области, расположенной севернее г. Бухареста и удаленной от Москвы на расстояние около 1400 км. Согласно официальным нормативным картам ОСР-97, территория г. Москвы расположена в зоне возможных 5-балльных сейсмических сотрясений, вероятность превышения которых на средних грунтах (грунты второй категории по СНиП II-7-81*) в течение 50 лет не более 1%. Ожидаемый сейсмический эффект, выраженный в дробных баллах, на территории г. Москвы составляет по карте ОСР-97А 3,8 бал.; по ОСР-97В — 4,2; по ОСР-97С — 4,6 и по ОСР-97D — 5,0 бал. В целочисленных единицах балльности это соответствует 4 бал. — по картам А, В и 5 бал. — по картам С и D.

2. Сопоставление спектральных характеристик скоростей и ускорений колебаний грунта на территории г. Москвы при сильных и умеренных землетрясениях Вранчской очаговой области обнаружило хорошее сходство спектров в широком диапазоне магнитуд этих землетрясений (от $M=5,1$ до $M=7,4$), что открывает новые возможности для получения на основе цифровых сейсмограмм достаточно надежных количественных данных о сейсмических воздействиях и спектрах реакции на них высотных зданий в г. Москве. Это указывает на необходимость создания системы сейсмического мониторинга на верхних, средних, нижних и подвальных этажах строящихся в г. Москве «высоток». Актуальной является сейсмометрическая регистрация колебаний от удаленных землетрясений на разных грунтах г. Москвы, в том числе в районах, где кристаллический фундамент залегают на глубинах от 1400 м (северная часть города) до 2750 м (южная часть).

3. Результаты сейсмологических и инженерных исследований свидетельствуют о необходимости уточнения СНиП П-7-81* [3] и корректировки МГСН 4.19-2005 [4]. В частности, в СНиП П-7-81* оценка сейсмической интенсивности для слабых и умеренных низкочастотных колебаний в зависимости от категории грунтов верхней 10-метровой толщи оказалась некорректной, так как в этих нормах отражен лишь опыт обследования последствий сильных землетрясений (более 6–7 бал.) из близких очаговых зон. Например, отнесение грунтов к III категории мало повлияет на характер колебаний от очагов Вранча и не потребует традиционного повышения ожидаемого сейсмического эффекта на 1 балл. Основное влияние на амплитудный уровень колебаний при этих землетрясениях оказывает мощность сравнительно низкоскоростной (в поперечных волнах) толщи четвертичных отложений и юрских глин, залегающих на известняках верхнего и среднего карбона.

Литература

1. 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.
2. Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах. (Гл. редакторы Страхов В.Н., Уломов В.И.). ОИФЗ РАН. М.: НПП Текарт, 2000.
3. СНиП П-7-81* – Строительство в сейсмических районах. Госстрой РФ, 2002. – С. 44.
4. МГСН 4.19-2005. Временные нормы и правила проектирования многофункциональных высотных зданий и комплексов в городе Москве. – М., 2006.
5. Уломов В.И., Арефьев С.С., Марченко А.Ю., Уломов И.В. Сейсмический мониторинг здания в районе строительства Третьего транспортного кольца в Москве // Сб. Научно-технической конференции «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений в районах развития опасных геологических процессов», 7-9 октября 2003 г. М.: МИИТ, 2003. – С. 64–65.
6. Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А. Оценка параметров сейсмической опасности для высотных зданий в Москве // Промышленное и гражданское строительство, №10. 2004. – С. 15–16.
7. Уломов В.И. Сейсмичность // Большая Российская энциклопедия. В 30 т. Том «Россия». 2004. – С.34–39.
8. Уломов В.И. Отзвуки дальних землетрясений в г. Москве // Земля и Вселенная, № 3. 2006. – С. 102–106.
9. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP), 1992-1999 // Annali di Geofisica. Vol. 42, № 6, December 1999. – P. 1230.
10. Bartel J.P. and Tobita T. NERA. F Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California. Department of Civil Engineering, April, 2001. – P. 44.

