# О СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА ВЫСОТНЫЕ ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ г. МОСКВЫ

В.И. УЛОМОВ, доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. научн. сотрудник Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН

**На основе анализа произошедших землетрясений прогнозируются характеристики сейсмических воздействий на здания и сооружения в Москве.**

Территорию г. Москвы постоянно сотрясает наземный и подземный транспорт, а также разного рода строительные работы. Случаются и взрывы... Доносятся сюда и отголоски естественных природных явлений – тектонических землетрясений. Все эти колебания земной поверхности регистрируются сейсмическими станциями, принадлежащими Геофизической службе Российской академии наук и расположенными как в центре г. Москвы, так и далеко за ее пределами.

В последние годы в связи с проектированием и строительством в г. Москве высотных зданий и сооружений возникла необходимость в дополнительной сейсмологической информации, в том числе и о слабых низкочастотных колебаниях, генерируемых далекими очагами сильных землетрясений, систематически возникающих в Восточных Карпатах (зона Вранча). В результате резонансных явлений такие колебания, даже едва различимые на земной поверхности, могут существенно повлиять на поведение строящихся «высоток».

Только за последние неполные 70 лет в г. Москве трижды ощущались достаточно сильные сейсмические колебания из Вранчской очаговой зоны – в 1940, 1977 и 1986 гг. Заметные «волнения» на верхних этажах зданий наблюдались и в 1990 г. Не осталось бы незамеченным Вранчское землетрясение 2004 г., будь оно чуточку посильнее. Вместе с тем, именно его цифровые сейсмограммы, записанные в центре г. Москвы, оказались для нас наиболее полезными, благодаря их высокому качеству.

## Вероятностный прогноз сейсмической опасности и приемлемый риск

Условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, сделали приемлемым лишь вероятностный подход к оценкам сейсмической опасности. Иными словами, риск всегда будет иметь место, но он должен быть правильно оценён и сведён к минимуму. Такая концепция заложена в комплекте нормативных карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97, созданных нами в 1991–1997 гг. в Институте физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (рис. 1).

Карты ОСР-97 позволяют оценивать степень сейсмической опасности для объектов разных категорий ответственности и сроков службы. Оценка осуществляется на трёх уровнях сейсмического риска, отражающих расчетную интенсивность сейсмических сотрясений в баллах шкалы MSK-64, ожидаемых на средних грунтах (грунты II категории, по СНиП II-7-81*), на конкретной площадке с заданной вероятностью и в течение определенного интервала времени. Карта ОСР-97А соответствует 10-процентному 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-процентному риску, предназначены для проектирования и строительства объектов повышенной ответственности и особо ответственных сооружений, в том числе и высотных зданий.

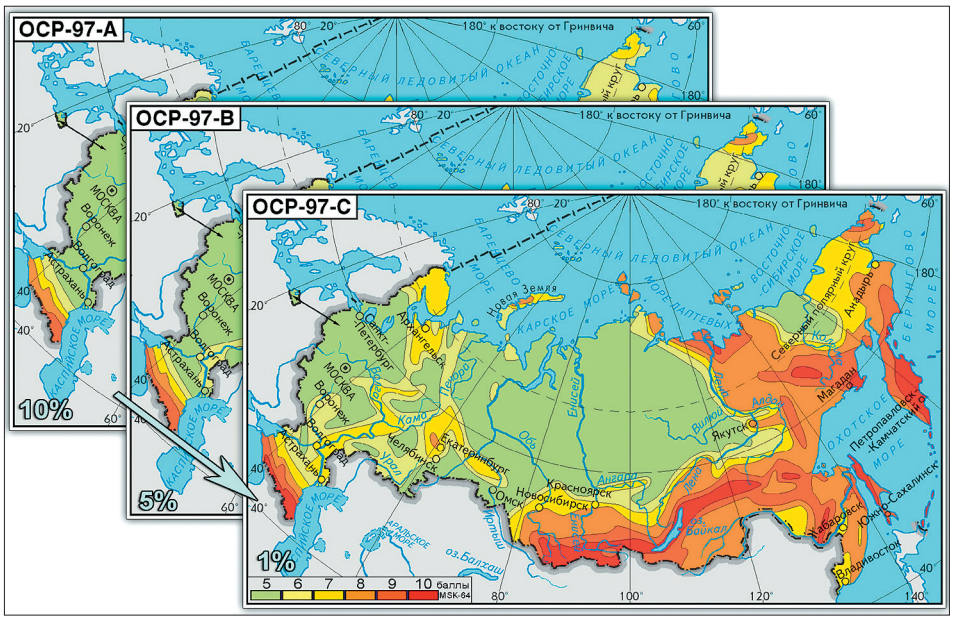


*Рис. 1.* ***Комплект нормативных карт сейсмического районирования территории РФ – ОСР-97.*** *Карта А соответствует 10%, карта В – 5% и карта С – 1% риску возможного превышения указанной на этих картах сейсмической интенсивности в течение интервалов времени продолжительностью 50 лет*

Восточно-Европейская равнина, 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, 1926 г.).

Наряду с этими сейсмическими явлениями на территории европейской части

нашей страны ощущаются также колебания от сильных землетрясений, происходящих в сопредельных зарубежных регионах (Восточные Карпаты, Крым, Кавказ, Центральная Азия). На северо-западе ощущаются землетрясения в Скандинавии (Норвегия, 1817 г.), на юге – сильные землетрясения Прикаспийского бассейна (Туркменистан, 1895, 2000 г.), Кавказа (Спитак, Армения, 1988 г.), Крыма (Ялта, 1927 г.).

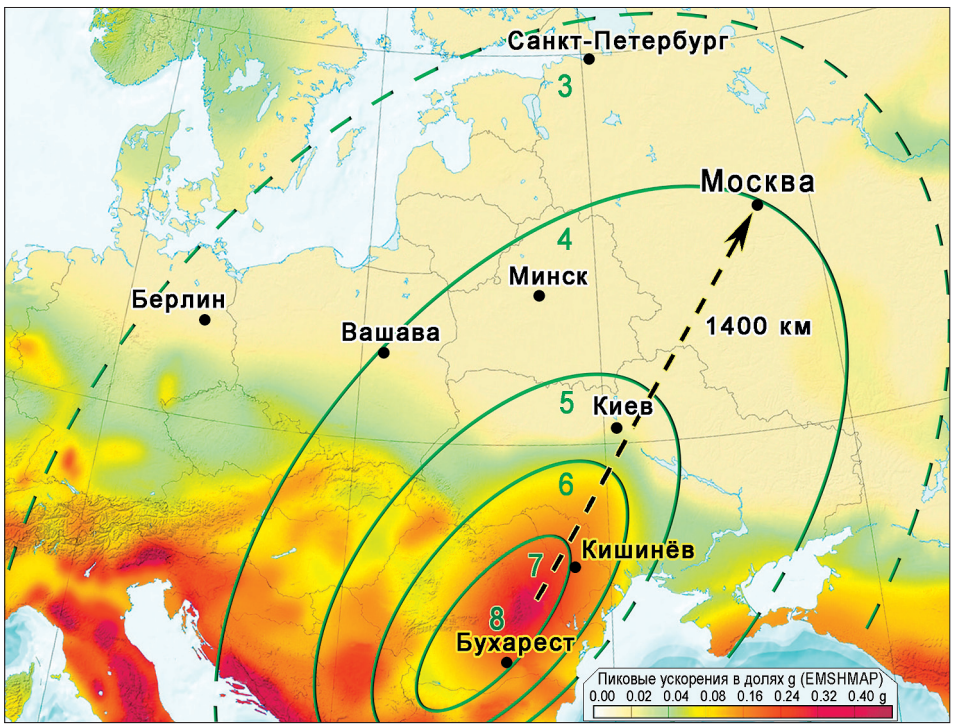


*Рис. 2.* ***Сейсмический эффект (цифры – баллы) Вранчского землетрясения 4 марта 1977 г. и фрагмент карты районирования сейсмической опасности на территории Европы*** *(пиковые ускорения в долях g с вероятностью 10% их возможного превышения в течение 50 лет). Бежевый цвет примерно, соответствует интенсивности до 5 баллов, зелёный – 5–6, жёлтый – 6–7, розовый – 7–8, красный – 8–9 и бордовый – 9 баллов и более*

## Сейсмические явления на территории г. Москвы

Территория г. Москвы традиционно считалась сейсмически безопасным районом. Ни в летописях, ни в литературных источниках нет сообщений ни об одном местном землетрясении. Имеется лишь упоминание о колебаниях в 1230 г. во «владимирской земле», интенсивность которых может быть оценена в 4–5 баллов. Центральная сейсмическая станция (ЦСС) «Москва», действующая в центре города (Пыжевский пер., 3) 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.

Согласно даже самым «суровым» оценкам ОСР-97, г. Москва расположена в 5-балльной зоне сейсмичности с чрезвычайно низким риском возможного превышения такой интенсивности в течение сотен лет. Ближайшая к г. Москве 6-балльная зона удалена от центра города на расстояние около 120 км и частично захватывает лишь восточную часть Московской области, не представляя никакой угрозы для города. Что касается местной геотектоники, то ни под городом, ни под его окрестностями, «живых» разломов земной коры не обнаружено.

Вместе с тем определенную угрозу высотным зданиям и сооружениям на территории г. Москвы представляют низкочастотные колебания, вызываемые прохождением сейсмических волн от крупных землетрясений, возникающих на глубинах 60–180 км в Восточных Карпатах, в районе Вранча, расположенном на территории Румынии севернее г. Бухареста, на расстоянии около 1400 км от г. Москвы (рис. 2). Так, во время землетрясений 1977 г. и 1986 г. на 14–18-х этажах зданий башенного типа в городе интенсивность колебаний, по-видимому, достигала 6-ти баллов, сопровождаясь повреждениями в виде небольших трещин на стыке стен и потолков. Наблюдались заметные качания шпиля здания МГУ на Воробьевых горах. Имеются также сведения о «великом» землетрясении 1802 г. и о более ранних сильных Вранчских землетрясениях.

Вытянутость изосейст Вранчских землетрясений в северо-восточном направлении обусловлена относительно слабым затуханием сейсмических волн в сторону г. Москвы и аналогичной ориентацией очаговой области Вранча. Огромные размеры площадей сейсмических сотрясений объясняются большой глубиной залегания очагов этих землетрясений (обычная глубина внутриконтинентальных очагов не превышает 25–30 км).

## Сейсмические воздействия на сооружения

При расчете динамического поведения зданий и сооружений при сейсмических воздействиях, как известно, исходными являются акселерограммы, характеризующие ускорения перемещения грунта. К сожалению, на ЦСС «Москва» до 1999 г. записи землетрясений велись лишь в аналоговой форме на фотобумаге, и их приходилось оцифровывать вручную. Более того, в случае сильных землетрясений даже специально загрубленная аппаратура зашкаливала, и информация о самых интенсивных сейсмических воздействиях пропадала. Так случилось и с сейсмограммой Вранчского землетрясения 4 марта 1977 г., когда удалось оцифровать лишь начальную часть вертикальной (не самой интенсивной) составляющей.

На рис. 3 проиллюстрированы три проекции (восток-запад, север-юг и вертикаль) цифровой акселерограммы движения грунта под ЦСС «Москва» во время последнего сильного Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (моментная магнитуда Mw=5,9, глубина очага около 100 км). Здесь же, внизу, приведен единственный доступный для анализа фрагмент вертикальной составляющей акселерограммы самого сильного за последние 60 лет Вранчского землетрясения, произошедшего 4 марта 1977 г. (Mw=7,4) на такой же глубине и повсеместно ощущавшегося в г. Москве. Сравнивая амплитуды ускорений на сопоставимых участках записей 1977 и 2004 гг., можно предположить, что максимальные ускорения на эталонном грунте, за который нами принят грунт под ЦСС «Москва» на глубине 4 метра от земной поверхности, превышали величину 1 см/с$^2$. При сравнении графиков коэффициентов динамичности (рис. 4),

составленных по вертикальной составляющей акселерограммы землетрясения 2004 г. (1) и по её фрагменту (2), эквивалентному по продолжительности имеющейся части записи землетрясения 1977 г., можно обнаружить потерю в 1977 г. полезной информации о низкочастотной компоненте сейсмических колебаний, наиболее важной для расчетов сейсмических воздействий на высотные строительные объекты г. Москвы.

Вместе с тем, благодаря уникальности Вранчской очаговой области, заключающейся в её чёткой локализации, подобии и достаточно часто повторяющихся подвижках пород в сейсмических очагах, полезную сейсмологическую информацию можно получить на основе статистического анализа большого числа менее значительных по магнитуде, но очень качественных, цифровых записей Вранчских землетрясений. Это и стало предметом наших нынешних исследований, имеющих целью экстраполяцию волновых форм землетрясений из этой очаговой области в сторону максимальной возможной их магнитуды,

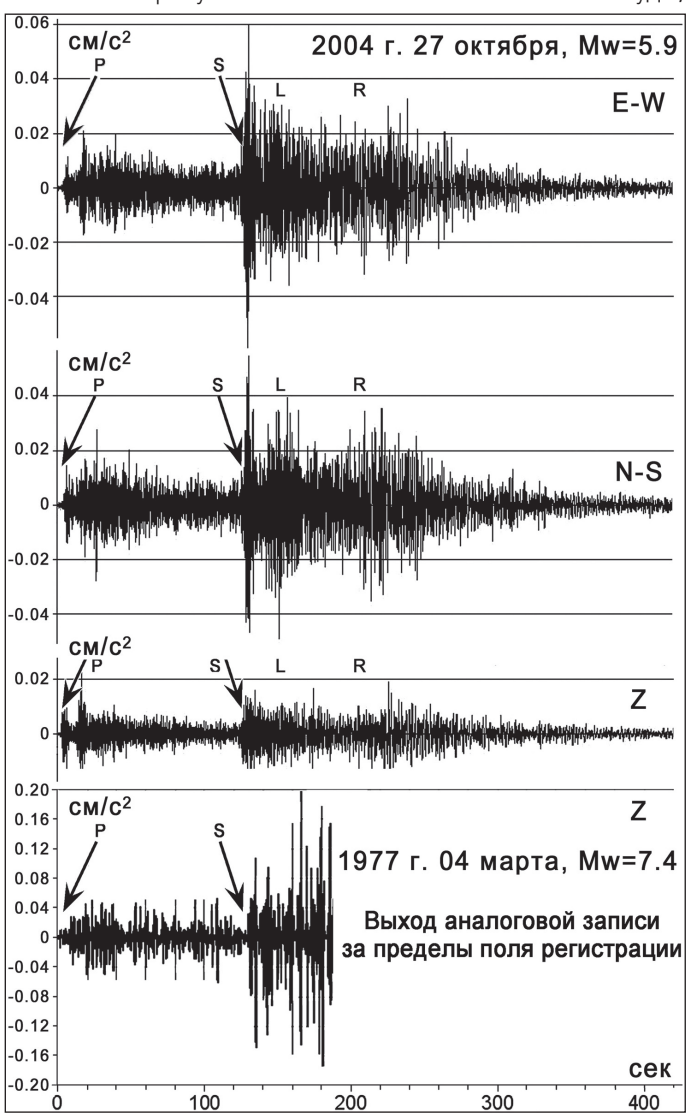


*Рис. 3.* ***Цифровая трёхкомпонентная акселерограмма движений грунта под сейсмостанцией «Москва» во время Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (магнитуда Mw=5,9) и фрагмент вертикальной составляющей акселерограммы при самом сильном за последние 60 лет Вранчском землетрясении 4 марта 1977 г. с Mw=7,4 (внизу).*** *Указано время прихода на ЦСС «Москва» продольных (P), поперечных (S) и поверхностных сейсмических волн Лява (L) и Релея (R). Сейсмометрическая аппаратура станции расположена в подвальном помещении, на глубине 4 метров от земной поверхности*

*Рис. 4.* ***Графики коэффициентов динамичности, составленные по вертикальной составляющей акселерограммы Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (1) и по её фрагменту (2), эквивалентному по времени имеющейся части записи землетрясения 1977 г.*** *(см. рис. 3). Отчетливо видна потеря низкочастотной составляющей сейсмических колебаний*

оцениваемой нами как Mw=8,0, т.е. подобной той, какой характеризуется «великое» землетрясение 1802 г.

Рассчитанная таким методом прогнозная акселерограмма доступна в цифровом виде в Лаборатории континентальной сейсмичности и прогноза сейсмической опасности ИФЗ РАН и в Лаборатории надежности сооружений ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко. Ожидаемые максимальные ускорения при гипотетическом Вранчском землетрясении с Mw=8,0 могут превысить 2 см/с² в частотном интервале от 0,1 до 1 Гц на эталонном грунте сейсмостанции «Москва». Здесь уместно заметить, что слабые и низкочастотные сейсмические воздействия, по-видимому, не соответствуют общепринятым в шкале MSK-64 соотношениям между интенсивностью, выраженной в баллах, и величинами ускорений колебаний грунта.

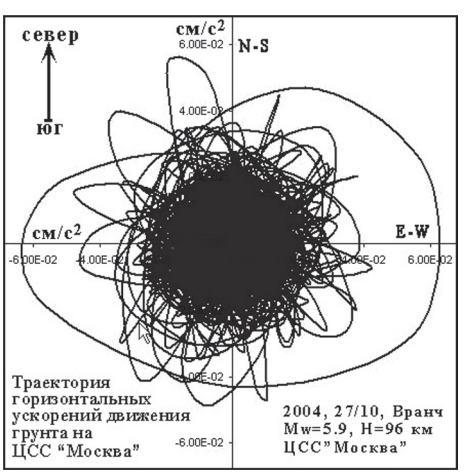


*Рис. 5.* ***Траектория горизонтальных ускорений перемещений грунта под сейсмостанцией «Москва» во время Вранчского землетрясения 27 октября 2004 г. (Mw=5.9), полученная в результате векторного сложения цифровых записей двух горизонтальных компонент – север-юг и восток-запад*** *(см. рис. 3)*

Следует также иметь в виду, что при низкочастотных сейсмических воздействиях (периоды колебаний 3–8 секунд и более), благодаря большим длинам волн, изменение категории грунтовых условий в верхней 10-метровой толще, как это представлено в СНиП II-7-81* для близких землетрясений, не должно приводить к ослаблению или усилению сейсмического эффекта. Уточнение этих оценок может осуществляться спектральным сейсмическим микрорайонированием (СМР).

Рис. 5 свидетельствует о неправомерности представлений о линейной поляризации сейсмических воздействий. Траектории

перемещений грунта при Вранчских землетрясениях гораздо сложнее и многомернее, а не ориентированы строго по направлению на источник сотрясений, как это обычно предполагается, и отличаются от ветровых и других динамических нагрузок. Как видно, наибольшим перемещениям свойственна широтная ориентация, а не направление на очаг землетрясения.

Необходимо также иметь в виду, что категорически не рекомендуется пользоваться «акселерограммой», помещенной в первую редакцию нормативного документа МГСН 4.19-2005 как якобы зарегистрированной при Вранчском землетрясении 4 марта 1977 г. на территории г. Москвы, т.е. на эпицентральном расстоянии около 1400 км. На самом же деле эта «акселерограмма» оказалась фальсификацией оригинала, полученного во время этого землетрясения сейсмической станцией NIS в Сербии, на расстоянии около 480 км от эпицентра.

## Долгосрочный прогноз Вранчских землетрясений

Знание характеристик сейсмического режима Вранчской очаговой области позволяет осуществлять долгосрочный прогноз этих землетрясений. Построения, приведённые на рис. 6, выполнены нами для Вранчских землетрясений с магнитудой 7,5±0,2, 7,0±0,2 и 6,5±0,2. Вдоль вертикальной оси отложено время (годы), а по горизонтальной оси – порядковые номера сейсмических событий в их хронологической последовательности (белые кружки).

Экстраполируя тренды развития сейсмических процессов в каждой из последовательностей, можно с определённой степенью достоверности вычислить интервалы времени (годы) возникновения очередных Вранчских землетрясений соответствующих магнитуд (серые кружки). Так, событие, подобное землетрясению 1977 г., по-видимому, произойдёт не ранее 2050 г. Землетрясение, аналогичное возникшему в 1986 г., может случиться в течение 2020–2030 гг., а очередное событие с M = 6,5±0,2 уже давно назрело. Наблюдается заметный «дефицит» и землетрясений с M =7,0±0,2, что указывает на повышенную вероятность их возникновения

*Рис. 6.* ***Последовательности произошедших (белые кружки) и прогноз будущих (серые кружки) сильных Вранчских землетрясений с магнитудами более 6,5, которые могут ощущаться в г. Москве***

гораздо раньше 2020 г. Землетрясения с M≥5,0 происходят практически ежегодно.

## Заключение

Согласно картам ОСР-97, территория г. Москвы относится к 5-балльной зоне. Однако на верхних этажах высотных зданий сейсмический эффект может возрасти на 1 – 2 балла.

Наибольшую опасность для высотных зданий в г. Москве представляют низкочастотные колебания (периоды от 1 до 10 секунд и более) от заглубленных очагов сильных землетрясений в Восточных Карпатах (зона Вранча), удаленных от г. Москвы на расстояние около 1400 км.

Первостепенным при оценке сейсмической опасности является сейсмическое микрорайонирование (СМР) площадей предполагаемого строительства высотных зданий и территории города в целом. При выполнении СМР в качестве эталонных грунтов следует принимать грунтовые условия места расположения сейсмостанции «Москва» (Пыжевский пер., 3), для которых выполнен расчёт сейсмических воздействий от Вранчских землетрясений. Для уточнения количественных параметров эталонных грунтов (плотность, скорости распространения сейсмических волн, упругие модули и др.) необходимы бурение и каротаж скважины на площадке по месту расположения сейсмостанции «Москва».

Для адекватной оценки сейсмических воздействий на высотные здания и сооружения необходим систематический инструментальный мониторинг на различных грунтах и на разных высотных уровнях. Главную роль при этом должен играть сейсмологический метод, включающий в себя расчет спектров Фурье и спектров реакции. Наряду с регистрацией землетрясений и определения их основных характеристик, для оценки сейсмических воздействий необходима реализация и других методов СМР, включая регистрацию низкочастотных (океанских) микросейсм Земли, измерение медленных наклонов земной поверхности и сооружений.

Результаты выполненных сейсмологических исследований свидетельствуют о необходимости уточнения строительных норм (СНиП II-7-81) в части оценки низкочастотных сейсмических воздействий интенсивностью 6 баллов и менее, а также корректировки норм и правил проектирования высотных зданий в г. Москве (МГСН). Исследования в этом важном направлении инженерной сейсмологии должны быть продолжены.

***Библиографический список:***

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 (главн. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов). Карта на 4-х листах. ОИФЗ РАН. – М.: НПП Текарт, 2000.*
3. *Уломов В.И., Севостьянов В.В., Миндель И.Г. и др. Оценка сейсмической опасности для высотных зданий в г. Москве // Современное высотное строительство. Монография (464 с.). – М.: ГУП «ИТЦ Москомархитектуры», 2007. С. 94–100.*