

УДК 550.34.09+550.343.4+550.348.098.32(47+57–25)(470.311)

К ОЦЕНКЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОТ УДАЛЕННЫХ ГЛУБОКОФОКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ВЫСОКИХ ЭТАЖАХ ЗДАНИЙ МОСКВЫ

© 2016 г. А. А. Никонов

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН),
Б. Грузинская ул., 10, Москва, 123242. Россия. E-mail: nikonov@ifz.ru*

Поступила в редакцию 12.05.2015 г.

В статье на исторических примерах с учетом изменений в природных условиях и характере строительства рассматриваются сейсмические воздействия на высоких ярусах строений и небоскребов. Определяются особенности сотрясений в Москве от наиболее сильных исторических землетрясений во Вранчской глубокофокусной очаговой зоне (Карпаты), выводятся оценки возможной максимальной интенсивности и повторяемости сотрясений в Москве от этого основного источника колебаний. По собранным сообщениям очевидцев о воздействиях сейсмических событий в 1977 и 2013 гг. определяется постепенное усиление эффекта по мере возрастания высотности этажей от нижних до 10–14, в большей степени – до 16–20 и особенно значимо – выше 23–25 этажей. Приведены единичные опубликованные результаты инструментальных наблюдений на разных этажах высоких зданий. Дано их сопоставление с интерпретацией инструментальных наблюдений на высотном здании МГУ на Воробьевых горах. Учитываются дополнительные факторы, влияющие на устойчивость конструкций, уязвимость сооружений и находящихся в них людей, очерчены возможные в будущем ситуации. Выделены основные факторы и тенденции, которые необходимо учитывать при оценке уровня возможной опасности и снижения рисков будущих воздействий в высотных ярусах сооружений в пределах мегаполиса и пригородов. Намечен ряд рекомендаций по направлениям дальнейших исследований, организации службы специализированных наблюдений и измерений, по превентивным мерам усиления безопасности.

Ключевые слова: *Москва, “Москва-сити”, сейсмические сотрясения, высотное здание, многоэтажное здание, макросейсмические сведения, сейсмические воздействия, повторяемость сейсмических событий, Вранчский сейсмический очаг, Вранчское землетрясение 04.03.1977 г., Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г., геологические риски, устойчивость высотных сооружений, изменение грунтовых условий, подтопление городской территории.*

“Непросвещенные полководцы и правители из-за внутреннего своего невежества, возведя высоченное строение и не выровняв основания, вместе с ним они сами рушатся. Ведь прежде всего нужен верный и нерушимый канон, а уж тогда к нему все остальное выверяется и прилаживается друг к другу”

Плутарх (45-120 гг. н.э.) “Застольные беседы”. М., 2008. С. 423.

“Чем выше изученность объекта, тем меньше вероятность получить неверную оценку (сейсмического) риска”

Нередко подразумеваемая, но редко реализуемая максима.

ВВЕДЕНИЕ

В мегаполисе Москва, как известно, существует несколько проблем, связанных с обеспечением устойчивости и сохранности строений и коммуникаций, а также с поддержанием бесперебойной работы технических служб и спокойствия населения при разного рода естественных и ру-

котворных воздействиях. В статье внимание сосредоточено на той части проблемы, которая относится к устойчивости и сохранности высотных зданий и высоких ярусов сооружений. Проблема стала актуальной с началом массового высотного строительства в столице и пригородах [8, 24, 25] (табл. 1, рис. 1) и проявлением неожиданных сотрясений в городе от весьма удаленного Охото-

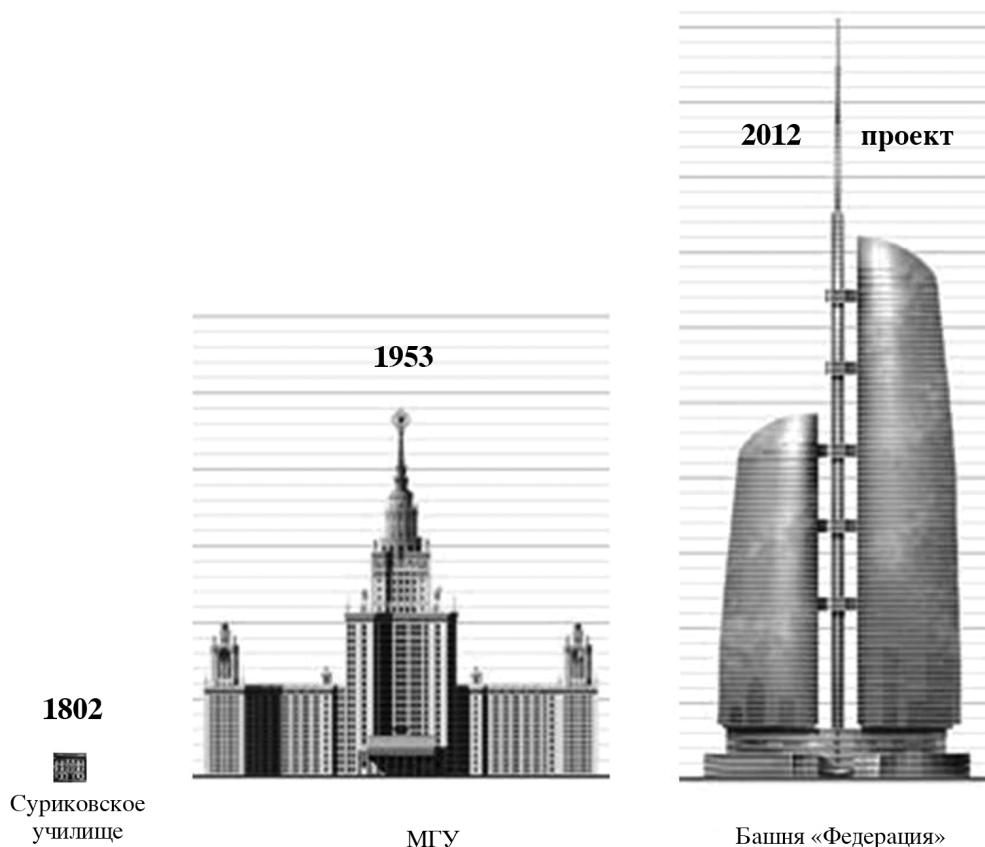


Рис. 1. Модельное представление увеличения этажности строений в Москве по столетиям на избранных примерах.

морского землетрясения 24.05.2013 г. [6, 10, 26]. Составленные около 15 лет назад руководство и выработанные тогда “Временные строительные нормы” [24] содержат ряд упущений и нуждаются в “актуализации” [8, 25]. Возникновение ощутимых колебаний в Москве от Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. [6, 28] – это очередное (в этот раз легкое) напоминание о существовании серьезной проблемы для современного, активно стремящегося вверх, вширь и вглубь мегаполиса.

Общая ситуация, результаты расчетов и инструментальных измерений. Уникальность ситуации и повышенная ответственность специалистов определяются: 1) столичным статусом и размерами мегаполиса, 2) наличием информации о сейсмопроявлениях за сотни лет и 3) ускоренно меняющимися характеристиками среды, объектов и субъектов воздействия.

До настоящего времени оценку сейсмических воздействий на высотные здания и на высокие

Таблица 1. Изменения этажности и статических нагрузок от веса зданий и сооружений в Москве за 200 лет [20]

Столетия	Этажность зданий	Нагрузка, МПа	Землетрясения
XVIII	1–2	≤ 0.05 –0.01	
XIX	3–5	0.15–0.2	1802, $M = 7.5$
XX	8–16–24	0.2–0.3	1940, $M = 7.3$, $M = 6.2$
XX–XXI	12–30–60	0.35–0.5	1977, $M = 7.2$
Рост за 200 лет	Увеличение в 10 раз	Увеличение в 15 раз	($M \approx 7.0$) Усиление не ожидается
XXI	Увеличение в 30 раз	?	

этажи зданий, несмотря на их большое количество в столице, невозможно осуществлять по инструментальным записям ввиду отсутствия представительного массива таковых. К решению задачи значимо продвинулись авторы публикаций [25, 31, 32], использовавшие расчетный метод с несколькими допущениями, обусловленными острым дефицитом не только инструментальных записей, но и конкретных макросейсмических наблюдений (по этажам) в высоких ярусах строений. В 2007–2008 гг. расчеты поневоле осуществлялись на основе макросейсмических сведений по приземным этажам с их последующей ориентировочной экстраполяцией с большими допусками. В то время не удалось вполне использовать исторический опыт наблюдений над эффектом на высотных строениях, оценить вероятные изменения среды и корректно определить средние (вероятные) интервалы сейсмических воздействий.

Необходимость оценки степени устойчивости при внешних воздействиях была осознана уже на стадии проектирования при массовом строительстве высотных сооружений. Основное внимание уделялось ветровым нагрузкам как наиболее частым, а сейсмическим воздействиям – в гораздо меньшей степени. Автору известны всего несколько публикаций, отражающих результаты представительных поэтажных измерений трехкомпонентными датчиками с записями и тщательной обработкой именно сейсмических воздействий. Сошлемся на главные результаты двух совсем свежих публикаций.

Обработка записей колебаний на каждом этаже 9-этажного здания в г. Иркутск при Байкальском землетрясении 2002 г. позволила обнаружить, во-первых, важность резонансных колебаний и, во-вторых, увеличение амплитуды ускорений на порядок на 9 этаже по сравнению с подвальным этажом того же здания [1]. Пункт измерений находился в 75 км от эпицентра, и интенсивность сотрясений в нем (на первых этажах) составляла VI–VII баллов.

Другой эксперимент осуществлен в г. Москве в высотном здании МГУ им. М.В. Ломоносова на Воробьевых горах при Охотоморском землетрясении 24.05.2013 г. [11]. В этом случае измерения осуществлены на 13 уровнях на высотных отметках от 20 до 222 м, в том числе в основной, наземной, в форме параллелепипеда, части здания на 6 уровнях от 1-го до 31-го этажа (3 и 149 м соответственно). Есть основания полагать измерения в этой части здания, в отличие от таковых на более высоких уровнях, в ротонде и шпиле МГУ, более представительными для большей части других

высотных зданий в городе, поскольку в этой части здание МГУ имеет форму параллелепипеда на всех этажах, содержит стальной каркас, а также оборудовано строительными швами, ограничивающим его от боковых более низких пристроек. Авторы исследования оперируют в основном частотой колебаний и величинами смещений на записях. Отмечается устойчивое нарастание величин смещений с высотой этажа, особенно в направлении прихода волн от источника. До высоты 23-го этажа (95.5 м) деформации конструкции интерпретируются как сдвиговые, а выше – как изгибные. Резкое нарастание амплитуды смещений, особенно на кривых по продольным волнам, наглядно видно на графиках именно с высоты 90–100 м. Важен уверенный вывод авторов о том, что в колебаниях “участвуют не только наземные конструкции, но и подземная часть сооружения, возможно с присоединенным грунтом основания” [11, с. 36].

В условиях единичности представительных измерений воздействий от удаленного землетрясения, тем более заведомо меньшего по величине и значимости, чем воздействия от многих землетрясений в Карпатском очаге в области Вранча, становится особенно понятна ценность конкретных наблюдений очевидцев, хотя и не содержащих точных количественных оценок.

Настоящая работа представляет попытку на основе дополнительно привлекаемых макросейсмических, но вполне конкретных сведений очевидцев, продвинуться в прояснении намеченных вопросов. Из-за отсутствия системы сбора макросейсмических наблюдений даже в последние десятилетия в масштабах города такого рода наблюдения малочисленны. Основной доступный материал относится к двум сильным сейсмическим событиям с удаленными глубокофокусными очагами. Это землетрясение 04.03.1977 г. во Вранчском очаге в Карпатах и Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. на Дальнем Востоке [6, 10]. Имеются сведения о воздействии на здания в Москве Вранчского землетрясения 10.11.1940 г. [12, 13], но тогда в столице высотных сооружений практически не было.

Об удаленных источниках сотрясений в городе и о местных землетрясениях. В отдельных публикациях сообщается, что ощутимые сотрясения достигают Москвы от “сильных землетрясений, происходящих в западной части Центральной Азии, на Северном Кавказе и в Крыму” [30, 31]. Между тем, документально известно только единичное сообщение о слабых ощущениях (по-видимому, на верхнем этаже) от Казанджикского землетрясения ($M = 7.0$) в 1946 г. в западной части

Копет-Дага, когда Москва еще была малоэтажной [13, 14]. При более сильных землетрясениях в Западной Туркмении от Красноводского землетрясения 1895 г. ($M = 7.7$) и Балханского 2000 г. ($M = 7.1$) III-балльные сотрясения с юго-востока достигли г. Пензы в первом случае и Среднего Поволжья – во втором, но далее по ощущениям людей они не отмечались. Ни одно из известных сильных коровых сейсмических событий на Кавказе и в Крыму на уровне ощутимых колебаний (II–III балла) не достигало не только столицы, но и вообще центральной части Европейской России. Исторические изыскания автора по землетрясениям Скандинавии не дали каких-либо данных за сотни лет, которые бы позволили считать, что отсюда сотрясения достигали хотя бы запада Русской равнины. В 1904 г. сотрясения от сильного землетрясения в Южной Норвегии ощущались к востоку не далее средней части бассейна Балтийского моря.

Местных землетрясений тектонического генезиса за всю 850-летнюю историю города ни в столице, ни в радиусе многих сотен километров от нее не было [14–18, 21].

Главный источник сотрясений в Москве – Вранчская зона. Фактически до 2013 г. была известна единственная очаговая зона, продуцирующая сотрясения и в центре Русской равнины, это зона глубокофокусных землетрясений Вранча в Карпатах. В условиях дефицита первичных сведений и учитывая актуальность вопроса, автор стремился использовать дополнительно тот факт, что центральные части Русской равнины (и соответственно территория Москвы), как это известно в основном по русским летописям, подвергалась сотрясениям от очаговой зоны Вранча на протяжении многих столетий [15, 17, 20].

Автор начал собирать макросейсмические сведения по Москве после землетрясения 4.03.1977 г., позднее частично публиковал их при общем рассмотрении проблемы [21, 22]. Специальное исследование по сильнейшим землетрясениям в зоне Вранча позволило корректнее оценить возможные значения M_{\max} и повторяемости соответствующих сотрясений в Москве для выяснения уровня и опасности/безопасности возможных в будущем воздействий в высотных секторах построек.

РОСТ ЭТАЖНОСТИ И ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Москва – мегаполис с территорией ядра около 1000 км², в котором постоянно проживает только голосующих около 12 млн человек (фактически,

вероятно, около 16 млн, тогда как в 1940 г. в городе проживало около 4.5 млн человек). Мегаполис и его окружение кардинально изменились за последние 60 лет: резко увеличилась площадь города и его население (постоянное и временное), жилые площади и коммуникации расширились во много раз, усложнилась инфраструктура. С 80–90-х гг. прошлого столетия в столице начался строительный бум одновременно с падением проектной и строительной дисциплины. В настоящее время прекратилось строительство 5-этажных домов, и сносятся таковые прежней постройки, вместо этого резко возросло число многоэтажных (10–16 этажей) и высотных (выше 24 этажей) зданий, процент которых определяется уже в 5–10%. К 2008 г. в пределах границ города насчитывалось 63 комплекса высотных объектов с учетом строившихся. Ныне на окраинах Москвы, в пригородах и городах Подмосковья таких объектов возведено еще свыше 200. Безусловно, тенденция нарастания темпов высотного строительства сохранится, соответственно возрастут масштабы изменений подземной среды, в первую очередь, дифференцированные нагрузки на грунты и гидравлические показатели (см. табл. 1).

О нарушениях устойчивости подземной среды при строительстве новых, даже среднеэтажных, зданий известно достаточно для общих заключений [5, 13, 19 и др.]. Яркие свидетельства воздействия нового строительства на ближайшую среду установлены в центральной части Москвы (до 2002 г. обнаружено 30 примеров) [2]. Дифференциация возникающих нагрузок и степень деформации грунтов вблизи высотных зданий, вполне понятно, неизмеримо больше. Между тем, при проектировании небоскребов, во всяком случае в конце XX в., геологическую среду принимали стационарной, а о воздействии на подземную среду при раскачивании высотных зданий в их основании и речи не было. В утвержденных в 2002 г. МЧС и Госкомархитектуры “Рекомендациях по оценке геологического риска на территории Москвы” о сейсмических воздействиях не упоминалось (и сейсмологи к составлению этих рекомендаций не привлекались). Подробнее вопрос разбирается в публикации [8].

В значительном масштабе произошло и продолжает осуществляться мощное вмешательство в подземное пространство разрастающегося города на глубину от 5 до 100 м. Оно сопровождается разнообразными и слабо контролируруемыми изменениями таких свойств, как влагонасыщенность грунтов, пути подземного стока, уровень и режим подземных и грунтовых вод, деформируемость и

прочность грунтов. Это связано с возбуждающим регулярными, частые вибрации движением метрополитена, с созданием мощных подземных комплексов под рядом государственных учреждений, с сооружением плотных и протяженных сетей коммуникаций, разного рода туннелей, подземных автопарковок в 5 и более этажей и др. По названным, да и по другим причинам сооружения, в том числе многоэтажные, одиночные и в виде кластеров, становятся более уязвимыми [13–18].

Величина инфильтрационного питания грунтовых вод, которые и создают подтопление, в 2–3 раза выше в городе, чем за его пределами в естественных условиях. Естественная циркуляция поверхностных и подземных вод настолько нарушена, а искусственные коллекторы в городе в таком состоянии (65% изношенности), что на $\geq 40\%$ городской территории водный уровень стоит не глубже 3 м от поверхности. Согласно прогнозу, дальнейшее развитие города вызовет активизацию подтопления, особенно в районах новой массовой застройки. Прогноз доли территории подтопления на начало 2010-х гг. по округам столицы колебался от 41 до 89% [17–19], т.е. в среднем на 10–20% больше, чем десятью годами ранее. Вряд ли за последние годы тенденция изменилась. Это означает ухудшение на больших пространствах прочностных свойств грунта, усиление колебаний сооружений, снижение устойчивости раскачивающихся высотных зданий и массивных комплексов. Связанные с подтоплением, требующие неотложных мер ситуации признаются особенно опасными в крупных городах с большой концентрацией населения и источников техногенных воздействий, ибо подтопление во всех случаях возникает при наличии техногенной нагрузки и зависит от ее интенсивности [6, 7].

Надо признать, что опасности серьезных повреждений, а тем более разрушений высотных зданий в столице и Подмосковье от удаленных землетрясений не существует. Но нельзя оставить без внимания воздействие расшатывания верхних этажей на основание (цоколь) и окружающую геологическую среду так, что могут оказаться спровоцированными вторичные, не предусмотренные при проектировании процессы во вмещающей фундамент среде. Так, например, в г. Ленинакане (ныне г. Гюмри, Армения) единственное 16-этажное здание уцелело, но его пришлось взорвать, поскольку оно начало крениться, так как не выдержало его основание. При этом решающее воздействие могли оказать изменившиеся свойства грунтов и изменение степени их водонасыщенности.

До середины XX в. было допустимо принимать во внимание только естественные грунтовые условия участков строительства. Ныне же решающее значение приобретают техногенные изменения геологической среды и в старых городских границах, и на вновь охватываемых строительством территориях. Конкретные примеры развития неблагоприятных процессов и их последствий приводились ранее [7, 14, 17, 19]. Есть и еще один фактор. В отличие от нижних и средних этажей верхние этажи высотных зданий, особенно башенного типа, подвергаются постоянным сильным ветровым нагрузкам, что не может не влиять негативно и на их прочность (“эффект усталости”), и на “расшатывание”, ослабление несущей основы и, следовательно, повышает их уязвимость. Это априорное суждение подкрепляется недавним исследованием на примере высотного здания МГУ на Воробьевых горах [11].

Как известно, в Москве значительную площадь занимают грунты слабые, обводненные и даже насыпные. Кроме того, имеются участки развития карстовых и суффозионных процессов [7, 13]. При выборе площадок под строительство это учитывается. Но не известно, учитывается ли и, если да, то, как именно, что даже на участках распространения грунтов со стабильными свойствами в спокойных условиях при сотрясениях и колебаниях уже на грани фоновой осязательности (II–III балла) грунты и сооружения в первую очередь меняют несущую способность в худшую сторону. Между тем уязвимость к воздействиям может значительно возрастать именно на участках размещения комплексов высотных зданий, где, как указано, среда может менять свойства на глубину десятков метров под сооружениями.

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ПЕРВИЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Исторические примеры. Приведем вкратце несколько примеров значимых в истории Москвы сейсмических проявлений.

Землетрясение 10.05.1230 г. выделяется среди других Вранчских событий XI–XIV вв., поскольку сведения о нем появились не только из Киевской Руси, но также и из Руси Владимиро-Суздальской (рис. 2). Более того, сотрясения захватили города Новгород Великий, Тверь (по вновь обнаруженным автором сведениям в Тверской летописи) и Смоленск. Не вызывает сомнения, что событие было выдающимся по распространению колебаний и их интенсивности на Русской равнине [16, 20]. Сила сотрясений как в очаге, несомненно,

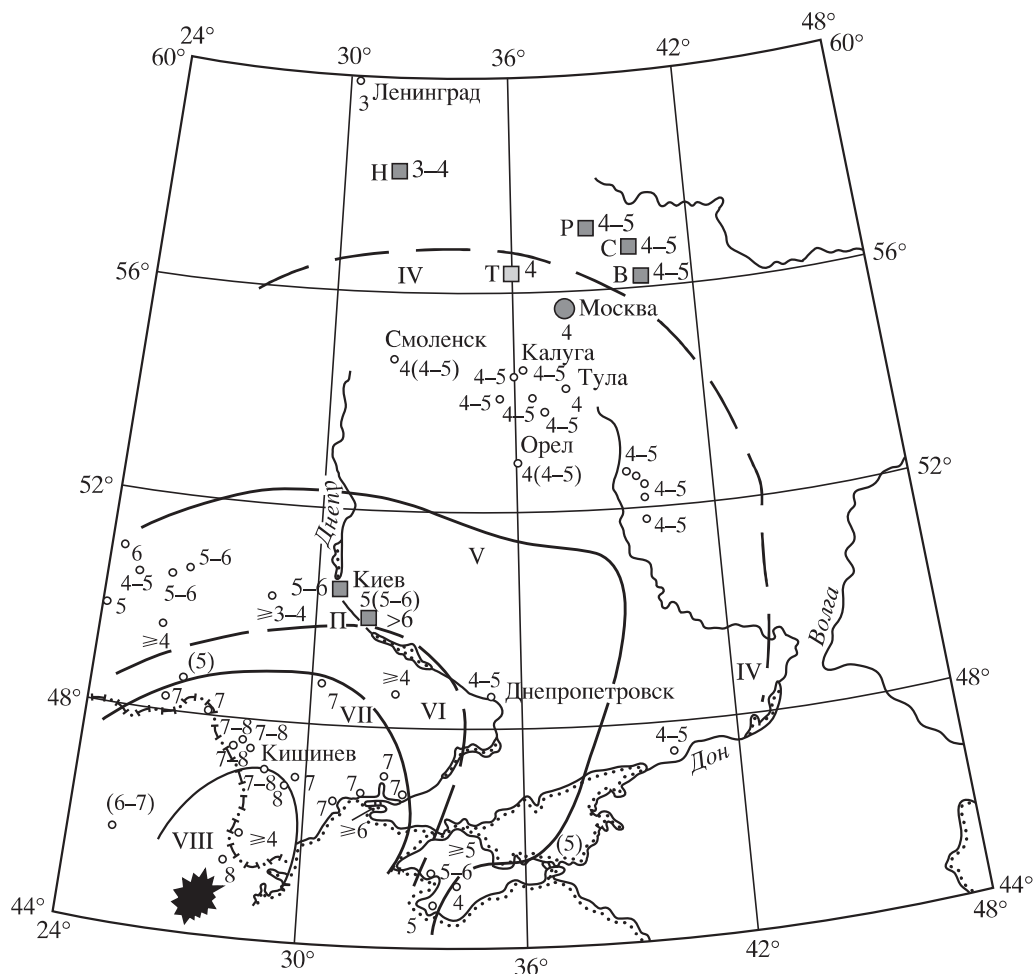


Рис. 2. Карта распределения интенсивности сотрясений (в баллах) на Русской равнине при Карпатских землетрясениях 3.04.1977 (линии изосейст) и 10.05.1230 г. (черные квадраты).

Вранчском, так и на всей Русской равнине, несколько превышала те значения, которые определялись для долго считавшегося сильнейшим Вранчского глубокофокусного землетрясения 1802 г. [20].

До татаро-монгольского нашествия (с 1237 г.) Москва упоминалась в летописях только как промежуточный пункт на пути из Руси Владимиро-Суздальской в Киевскую Русь. В свете собранных сведений из расположенных тогда к северу от Москвы городов стало трудно сомневаться в том, что в 1230 г. территория города сотрясалась с интенсивностью не менее IV–V баллов, а скорее около V баллов (на уровне первых этажей) [20], т.е. испытала тогда более сильные воздействия, чем при землетрясениях 1802, 1940 и 1977 гг. Это воздействие теперь надо считать максимальным из известных в центре Русской равнины за почти тысячелетнюю историю, и его интенсивность может быть принята за максимально возможную

(I_{\max}) в Москве не по расчетам с разными допускками, а по реальным данным.

Землетрясение 26.10.1802 г. наиболее сильное из возникших в очаговой зоне Вранча в новейшей истории [16, 29]. С интересующего нас угла зрения примечательно следующее малоизвестное донесение московского обер-полицмейстера Киверина на высочайшее имя. “...О случившемся в здешней столице 14 числа землетрясении [В]вашему [И]императорскому [В]величеству всеподданнейшие доношу, что землетрясение сие большую часть ощутительно было в верхних этажах больших домов. Везде колебались в оных мебель и прочие домашние предметы. Работавшие на Спасской башне в Кремле чувствовали трясение оной, а в доме актера Сандунова актеры от сильного колебания жившие в оном начали было выходить вон. В общем вредных последствий нигде не случилось, кроме...” [13, 17]. Верхними этажами тогда считались 3-й и 4-й этажи, правда, при высоких потолках.

Землетрясение 23.02.1838 г. в Москве также отозвалось, но очень слабо. Газеты сведений о нем не публиковали. О нем известно лишь одно краткое сообщение: "... в студенческом общежитии в верхнем этаже старого Университета... вдруг столики с горевшими на них свечами стали отодвигаться от стены, а неплотно затворенные двери начали хлопнуть... На другой день мы слышали, что в верхних этажах некоторых высоких московских домов в посудных шкафах было перебито немало посуды, а в некоторых стенах верхних этажей образовались трещины" [17, с. 79]. Левое крыло Университета на Моховой имело 4 этажа, потолки высокие, комната могла быть угловая, обращенная к югу. Формально по вышеприведенным указаниям интенсивность можно принять (по 1–2-м этажам) в IV балла, но сведения слишком скупы. Важно, однако, что уже тогда отмечено резкое усиление колебаний здания на этаже, который в современных зданиях соответствовал бы этажу не выше 6-го.

Вранчское землетрясение 4.03.1977 г. изучалось нами специально (см. ниже). В публикациях [30, 31] сообщается, что во время землетрясений в Карпатах в 1977 и 1986 гг. на 14–16 этажах зданий башенного типа интенсивность колебаний достигала VI баллов, возникали небольшие трещины на стыках стен и потолков. В нашем построении (см. ниже) эти сведения не учтены как недостаточно конкретные, но они вполне согласуются с сообщениями, полученными от других лиц. Кроме того, известно, что в высотных башнях люди падали со стульев, свалился и охранник на верхнем этаже (в ротонде под шпилем) высотного здания МГУ им М.В. Ломоносова на Воробьевых горах, хотя на земле многие люди вообще не ощутили сотрясений [13]. Наиболее значимый из ставших известными автору факт – это последствия землетрясения 04.03.1977 г. на верхних этажах двух таких соседних башен в Бирюлево: там швы между наружными стеновыми панелями разошлись так, что образовались щели.

Вопрос особой значимости – о качестве строительства – здесь не рассматривается. Упомянем только один красноречивый факт из времен нового строительства в Москве в конце 70-х гг. XX в. Пенсионеру, инженеру по образованию, ввиду сноса его дома в пос. Ховрино, предложили на выбор квартиру в новостройках. Он провел несколько дней на строительстве в нескольких предлагавшихся ему домах. Там инженер увидел столь самобытные способы строительства, что от всех вариантов вынужден был отказаться. В конце концов, ему предложили переехать в уже

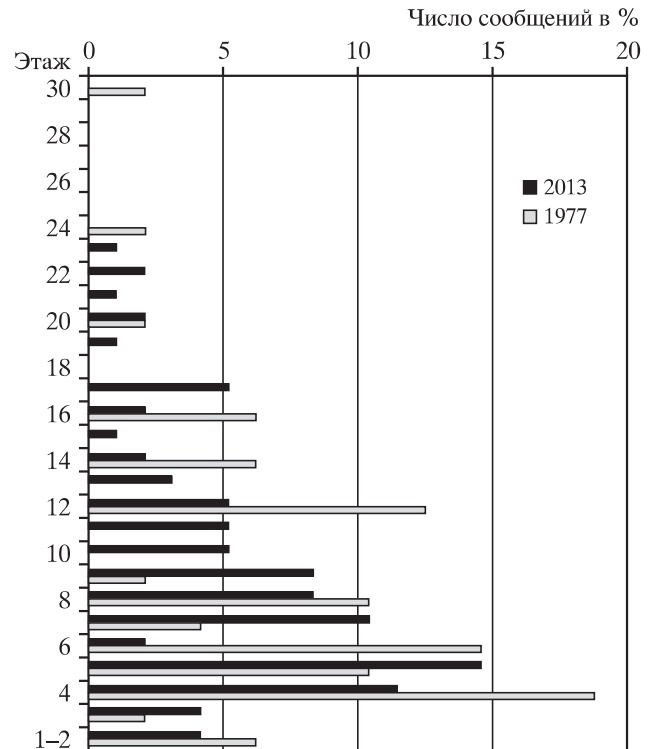


Рис. 3. Сейсмические воздействия в Москве от удаленных глубокофокусных землетрясений в зависимости от высоты зданий (1977 г. – 48 пунктов наблюдения, 2013 г. – 96 пунктов наблюдения).

сданный дом на ул. Войковской, в квартиру на 1 этаже. Немного освоившись в новой квартире, он заметил, что одна из внутренних стен несколько наклонена. Несколько раз вызывали комиссию. Когда она, наконец, появилась, стена вверху уже отошла от потолка и наклонилась в соседнюю квартиру. Швы-стояки, как оказалось, не были заварены. Эпизод подлинный, с актом комиссии.

Анализ сведений о воздействиях при удаленных землетрясениях 1977 и 2013 гг. Конкретные сведения от очевидцев о макросейсмических сотрясениях в городе при землетрясении 1977 г. не публиковались, их автор собирал индивидуально. В 2013 г. сбор сведений был более организован, но осуществлен также в небольшом для мегаполиса объеме [6]. Все же появилась некоторая основа для сопоставления сведений не только по нижним, но и по высоким этажам. Распределение долей собранных от очевидцев сведений (% от общего числа) о сотрясениях при указанных событиях (рис. 3) демонстрирует неравномерность и неполноту данных, особенно выше 15–17 этажей. На рис. 3 отражено изменение интенсивности сотрясений при каждом из рассматриваемых событий по этажам и их группам (высотным секциям). Судя по единичным сведениям с верхних

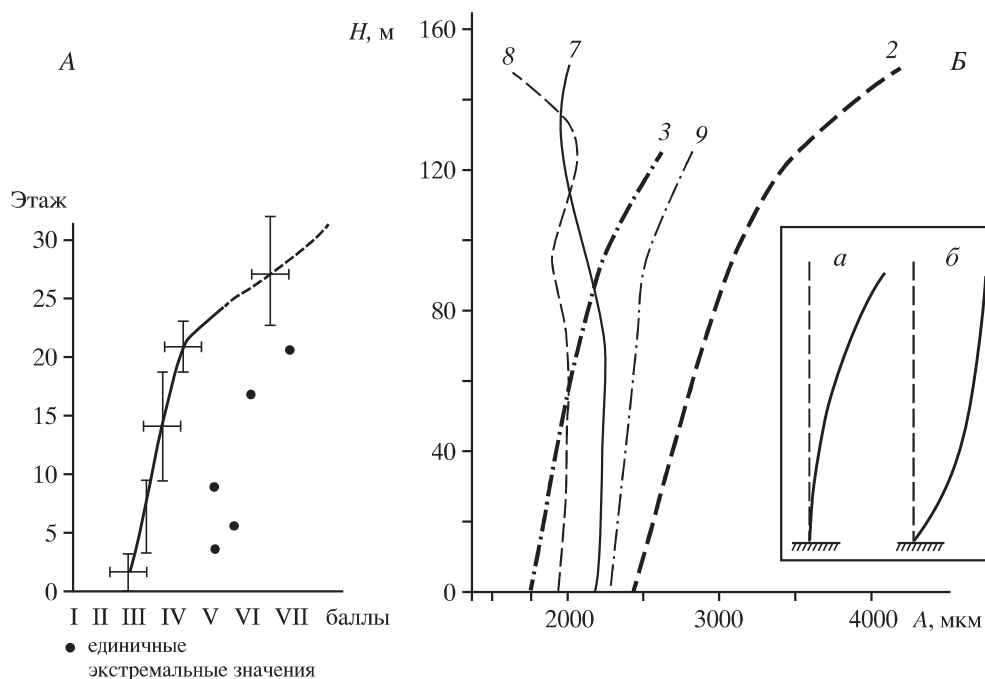


Рис. 4. Графики распределения интенсивности сотрясений зданий в Москве по этажам (высотным ярусам). *А* – по имеющимся наблюдениям очевидцев. Крестами показан вероятный разброс значений, пунктиром намечена слабо обоснованная часть кривой нарастания интенсивности [22]. *Б* – по записям сейсмографами разных компонентов объемных волн [11]. Амплитуды смещений от Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. на разных высотных отметках главного здания МГУ на Воробьевых горах. 2, 3 – по продольным волнам; 7, 8, 9 – по поперечным волнам. x , y , z – компоненты смещений. На врезке дана теоретическая схема распределения амплитуд колебаний здания по горизонтали при работе на изгиб (*а*) и сдвиг (*б*) [11].

секций, интенсивность изменялась от II–IV баллов на двух первых этажах до VI–VII баллов на этажах выше 20-го (рис. 4). Эти определения не означают, что такие сотрясения присущи колебаниям от удаленных глубокофокусных землетрясений во всех высотных зданиях по всей Москве, они только намечают тренд. Но достойно быть специально отмеченным, что сходные результаты получены при обработке инструментальных измерений во время землетрясения 24.05.2013 г. в Главном здании МГУ на Воробьевых горах [11] (см. рис. 4).

В малоэтажных зданиях наибольший эффект при названном землетрясении отмечен на ул. Лесной, из-за чего пришлось эвакуировать людей с 3–5 этажей, предположительно можно связывать с нарушением путей подземного стока вод из-за строительства глубоких котлованов для устройства развязки на ближайшей площади у Белорусского вокзала.

Уточнение силы воздействий. Собранные фактические данные обнаруживают, таким образом, что на этажах выше 14-го эффект может усиливаться на II–III балла, а экстремально и более, а не на I–II балла, как принималось ранее, в том

числе при расчетах [25, 32, 33]. Следовательно, в высотных зданиях на этажах выше 20–24-го возможны, кроме психологических воздействий и некоторой дезорганизации образа жизни (как случилось в 1977 г.), и мелкие повреждения в зданиях, и нарушения внутренней обстановки в них.

По собранным (в архиве автора) фактическим опросным сведениям можно считать реальностью два общих положения, которые были предопределены *a priori*.

1. Степень реакции зданий в столице на слабые сейсмические воздействия от удаленных сейсмических очагов прямо зависит от длительности существования зданий, их конструктивных особенностей и, естественно, от качества строительства и ремонта.

2. В общем случае сейсмические воздействия возрастают с ростом этажности здания, но их конкретные проявления зависят и от ряда других причин, таких, как геологические и гидрогеологические условия, конструкция сооружения, степень его “усталости”, характерные спектры собственных колебаний в соотношении со спектральными характеристиками землетрясений из разных удаленных очагов и др.

3. Проблема оценки опасности и риска сейсмических воздействий в практическом отношении значима именно, если не исключительно, применительно к высотным зданиям и небоскрегам, тем более при массовом их строительстве, как это имеет место в столице.

Автору не удалось узнать сколько-нибудь конкретных сведений о влиянии местных инженерно-геологических условий и их изменений под высотными зданиями, которые бы подтверждали знания общего характера в этом отношении. Из имеющихся сведений по историческим землетрясениям 1802, 1940 гг. и последним, 04.03.1977 г. и 24.05.2013 г., как они проявлялись в Москве, можно сделать некоторые предварительные обобщения. С ростом этажности застройки и удельного веса высокоэтажных зданий в городском фонде ситуация меняется – интенсивность колебаний (преимущественно горизонтальных) возрастает до III–IV баллов на 10–18 этажах. На этажах примерно от 20-го и выше сотрясения могут иметь интенсивность IV–VI баллов, т.е. вызывать не только испуг, но и панику, при этом могут возникать даже отдельные повреждения за счет сильного бокового раскачивания высотных зданий. В единичных случаях (Спасская башня Кремля, главное здание МГУ им. М.В. Ломоносова на Воробьевых горах) сотрясения наверху оцениваются до V–VII баллов по шкале MSK-64. Из гражданских строений наиболее неопределенна сейсмическая устойчивость к колебаниям одноподъездных башен, особенно каркасно-щитовых, которые, пока априори, следует считать более уязвимыми.

К ОЦЕНКЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЫСОКИХ ЯРУСАХ ЗДАНИЙ И ИХ ПЕРИОДИЧНОСТИ

О каталоге сильных Вранчских землетрясений прошлого. Землетрясение 04.03.1977 г. не было максимальным по выделенной энергии. Его магнитуда определена $M = 7.1 \pm 0.2$. Между тем в той же очаговой зоне Вранча землетрясения 10.11.1940 г. и 26.10.1802 г., сотрясения от которых достигали Москвы, имели более высокие значения магнитуд: $M = 7.3–7.5$. Соответственно, они могли вызвать и более сильные колебания на высоких этажах, если бы тогда существовали столь высокие здания, как теперь.

К выяснению вопроса о максимальном по силе землетрясении во Вранчской очаговой зоне автор подошел путем проверки и уточнения оценок в соответствующих каталогах за почти 900 лет,

которые (оценки), как оказалось, значительно различаются. Обнаруженные факты и проведенные сравнения выявили в существующих каталогах нестабильность определений параметров для периода позднего средневековья, причем без какой-либо системы в отклонениях. На практике это означает ненадежность приводимых в них для XVIII–XIX вв. параметров (табл. 2). Ревизия каталогов глубокофокусных землетрясений в очаговой области Вранча проведена на основе сбора заново всех известных ранее первоисточников и с добавлением вновь обнаруженных исходных данных по ряду событий. Усовершенствованная версия каталога наиболее сильных событий охватывает период XI в. – первая половина XVII в. (1100–1650 гг.) (табл. 3). События со второй половины XVII в. до середины XX в. автором не пересматривались, их параметры заимствованы из базового каталога [23]. Здесь отразим результаты только применительно к самому раннему и малонадежному разделу каталога Вранчских глубокофокусных землетрясений.

В базовом каталоге [23] и в последующих публикациях [15, 27, 30–33] за период с конца XI в. по середину XIII в. насчитывали 7(!) сильных землетрясений во Вранчском очаге. Такой концентрации сильных событий в нем в последующие века не отмечалось и это представлялось весьма странным. Особенно выделялось очень частое повторение сильных событий в 1091, 1107, 1122, 1126, 1196 и 1230 гг. Эти землетрясения без пояснений относились именно к Вранчским глубокофокусным на основе указаний в русских летописях типа “в Киевской Руси”, “на Руси”. Из всех семи событий только для 1230 г. были сведения об одновременности сотрясений в Киевской и во Владимиро-Суздальской Руси, что давало твердое подтверждение возникновения землетрясения именно во Вранчском очаге [20].

После специального анализа и русских, и европейских источников удалось прояснить необычную ситуацию, как она представлена в [23] и повторена в [34]. Установлено следующее: 1091 г. – падение метеорного тела, 1107 г. – землетрясение, по-видимому, в земле Тмутараканского княжества, 1126 г. – землетрясение в Южной Польше, 1196 г. – эпицентр землетрясения в Крыму. Таким образом, выяснилось, что во Вранчском очаге и в XI–XIII вв. за 150–200 лет возникло всего 2 сильных землетрясения, но никак не 7! Никакой аномалии не существует, кроме как в умах исследователей и в узаконенных каталогах. Следовательно, осуществлявшиеся на основе не-

Таблица 2. Различия в локализации и интерпретации генезиса сотрясений в ранние века средневековья в [17] и по исследованиям автора [16]

№ п/п	Дата	I_0	M	Источник
1.	1091	VII (± 1)	6.2 ± 1	23
		Импактное сотрясение		22
2.	1107. 12. II	VI–VII (± 1)	6.2 (± 0.5)	23
		Сотрясения в половецких станах		22
3.	1122. X	VI–VII (± 1)	5.9 (± 1)	23
		VIII–IX (± 0.5)	7.2 (± 0.3)	22
4.	1126. 6. VIII	VII ± 1	6.2 (± 1)	23
		Очаг в ином месте		22
5.	1170. 01. IV	VIII (± 1)	7.0 (± 1)	23
		Грозовые явления		22
6.	1196. 13. II	VIII (± 0.5)	6.9 (± 1)	23
		VIII (± 0.5)	6.9 (± 0.5)	22
7.	1230. 10.V	VIII–IX (± 1)	7.1 (± 0.7)	23
		X (± 0.5)	7.7 (± 0.3)	22
8.	1327	VIII–IX (± 1)	7.0 (± 1)	23
		Сотрясение в Новгороде		22

достоверного каталога расчеты, в том числе прогнозные, не могут иметь силы надежных.

К определению максимальных по силе воздействий в Москве. Следует различать два аспекта вопроса. Первый – это уточнение сейсмического фона на территории центра Русской равнины, что включает определение исходной, фоновой балльности в рамках общего сейсмического районирования (ОСР). Здесь речь идет о максимальных наблюдаемых (которые для Москвы ввиду длительного срока их фиксации правомерно принимать за максимально возможные) сотрясениях, в баллах шкалы MSK-64 на нормальных грунтах, на уровне первого этажа, при низком стоянии уровня грунтовых вод. В рамках решения первого вопроса важна оценка средних интервалов повторения сотрясений в городе от глубокофокусных сильных событий именно во Вранчском очаге.

Второй аспект – это реальная степень сейсмической уязвимости в разных районах города в основном за счет локальных условий, сезонных факторов и разной этажности. Этот, специальный, аспект рассмотрен в публикациях [19, 25].

О средней повторяемости сотрясений в Москве от сильных удаленных землетрясений. При прогнозе степени опасности/безопасности будущих событий необходимо учитывать и временной фактор. Попытки определять возможный предел интенсивности и средний интервал повторения

сотрясений в столице от сильных землетрясений во Вранчском очаге уже делались ранее [27, 29–32] (табл. 4). Корректность решений зависит, естественно, от представительности и надежности каталога (см. выше), а также от принятия во внимание того факта, что при отдельных, действительно, глубокофокусных Вранчских землетрясениях, господствующим направлением излучения оказывалось не северо-восточное (в сторону Москвы), как это случилось, например в 1838 г., а восточное и юго-восточное (в сторону Крыма).

До сих пор вовлеченные в решение проблемы специалисты сейсмологи и инженеры-геологи пользуются несовершенным каталогом Вранчских землетрясений с завышенными оценками повторяемости самых сильных из них [25, 30–32]. В авторском варианте каталога интервалы между самыми сильными событиями во Вранчском очаге оказались, за счет исключения ложных событий и землетрясений с очагами в других местах, существенно больше, т.е. землетрясения в нем возникали значительно реже, как и ощутимые в Москве сотрясения от них. Поэтому и приведенные в [27, 31] величины интервалов между сотрясениями в Москве (табл. 4, крайняя правая колонка) надо считать сильно укороченными, за исключением сотрясений III балла. Кроме того, при прогнозных оценках в отношении Москвы нельзя использовать несколько сильных Вранчских событий, таких как 1790 и 1838 гг., при кото-

Таблица 3. Усовершенствованная версия каталога сильнейших средневековых землетрясений во Вранчской очаговой зоне. Составитель А.А. Никонов

№ п/п	Дата землетрясения	Время	Координаты	Глубина очага, км	M	I ₀
1.	1100		(45.7; 26.6) ±0.5	130 ±50	7.3 ±0.3	8–9 ±0.5
2.	1122 октябрь ±1 месяц		(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	7.2 ±0.3	8–9 (±0.5)
3.	1126 август 8	00 00 ±6 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	(6.2) ±1.0	(7) ±1
4.	1196 март 12	07 00 ±6 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(100) 70–130	(6.9) ±0.5	(8) ±0.5
5.	1230 май 10	07 00 ±6 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	(7.7) ±0.3	(10) ±0.5
6.	1258		(45.7; 26.6) ±0.5	(100)±30	7 ±0.2	(8–9) ±0.5
7.	1471 август 29	08 00 ±6 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	7.1 ±1.0	8–9 ±1
8.	1681 август 18	00 00 ±1 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 75–200	6.7 ±0.5	8 ±1
9.	1738 июнь 11	10 00 ±1 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 75–200	7.0 ±0.5	8–9 ±1
10.	1790 апрель 6	19 29 ±10 м	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 75–200	6.9 ±0.5	8 ±1
11.	1802 октябрь 26	10 55 ±10 мин	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	7.6 ±0.3	9.5 ±0.5
12.	1821 февраль 10	00 ±6 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(100) 80–150	6.0 ±0.5	(6–7) ±0.5
13.	1821 ноябрь 17	13 30 ±1 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(130) 75–150	6.5 ±0.5	7–8 ±0.5
14.	1829 ноябрь 26	01 40 ±10 мин	(45.7; 26.6) ±0.3	(150) 100–150	7.3 ±0.3	8–9 ±0.5
15.	1838 январь 23	18 36 ±10 мин	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	7.5 ±0.2	9 ±0.5
16.	1868 ноябрь 13	06 50 ±10 мин	(45.7; 26.6)	100–150	6.3 ±0.5	8.5 ±0.5
17.	1880 декабрь 25	14 30 ±10 мин	(45.7; 26.6)	140 ±10	6.5 ±0.4	7 ±0.5
18.	1893 август 17	14 45 ±1 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	100	6.2 ±0.5	7 ±0.5
19.	1893 сентябрь 10	03 42 ±10 мин	(45.7; 26.6) ±0.5	100 50–150	6.1 ±0.4	7 ±0.5
20.	1894 август 31	12 20 ±1 ч	(45.7; 26.6) ±0.5	(150) 100–170	6.5 ±0.7	8 ±1
21.	1934 март 29	20 06 48 ±5 с	(45.7; 26.5) ±0.2	150 ±20	6.9 ±0.5	8 ±0.5
22.	1940 октябрь 22	06 37 00 ±1 с	(45.9; 26.5) ±0.1	150 ±10	6.2 ±0.5	7 ±0.5
23.	1940 ноябрь 10	01 39 07 ±1 с	(45.8; 26.8) ±0.1	150 ±10	7.3 ±0.3	9 ±0.5

Таблица 4. Сопоставление оценок разными исследователями средних интервалов повторения сильных землетрясений в очаговой области Вранча, I – баллы в шкале MSK-64 для приземных этажей

М	Уломов [31, 32]	Татевосян [27]	Никонов [20, 22]	Татевосян для Москвы [27]	
				I, баллы	Интервал повторения
8	300	250	≥ 800	IV	182
7.5	140	77	180 ± 50	III–IV	74
7	30	29	30 ± 20	III	30

рых основное излучение пошло на восток, и широты г. Москвы ощутимые колебания от них не достигали. Помимо средних интервалов между главными событиями надо учитывать необычную длительность колебаний (несколько минут) [24, 31, 32], возможность парных событий в течение недель (как случилось в 1940 г.) и/или минут (как, например, в 2013 г.).

“Москва-Сити” и башня “Федерация”. Наиболее крупный и важный высотный комплекс столицы “Москва-Сити” требует отдельного рассмотрения. Даже имеющихся к настоящему времени сведений о взаимосвязанности процессов в природно-техногенной системе “сооружение–среда” достаточно, чтобы принимать – высотные сооружения безусловно относятся к таковым. Тем более, когда речь идет не об отдельных зданиях, а о комплексах, к которым “Москва-Сити”, несомненно, принадлежит. Здесь осветим только два аспекта.

На территории г. Москвы активные разломы не установлены, однако выделяются так называемые “геодинамически активные зоны”. Основная геодинамически активная зона в городе в виде полосы шириной 5–6 км намечена как пересекающая город в северо-западном направлении, в общем соответствии с направлением долины Москвы-реки [4]. Квартал “Москва-Сити” находится на Краснопресненской набережной на берегу Москвы-реки в пределах этой зоны. В геодинамических зонах имеются участки с повышенной трещиноватостью горных пород и, соответственно, с увеличенной флюидопроницаемостью, развитием карстовых и карстово-суффозионных процессов [4]. Именно в них в первую очередь могут изменяться со временем несущая способность грунтов и/или гидравлические условия в водоносных горизонтах в период строительства и эксплуатации высотных сооружений. На изданной в 1997 г. карте подтопления г. Москвы [13] квартал “Москва-Сити” оказался в узкой полосе между постоянно подтопляемым и неподтопляемыми участками

территории, что само по себе нельзя признать благоприятным. Маловероятно принимать, что с тех пор ситуация изменилась.

На изданной в 2011 г. “Схеме мощности низкоскоростных (мелкодисперсных) грунтов” площадь, занятая кварталом “Москва-Сити”, оказалась в пределах редкого в городе участка резкого изменения мощности рыхлых отложений от 10 до 60 м [25]. В той же публикации специалисты впервые сделали вывод следующего содержания: “характерная особенность зависимости (рис. 3) – рост сейсмической интенсивности от 4.0 до 5.5 балла при возрастании мощности от первых метров до 50–70 м” [25, с. 124]. Напомним, что речь идет об интенсивности на уровне земли и первых этажей. Иными словами, V с половиной баллов на данном участке – это исходный балл. А что должно было и нужно ожидать на этажах 30-м, 60-м, 90–100-х? Об обнаруженной позднее закономерности инженеры-проектировщики и инженеры-строители, естественно, не знали. В 2006 г. в действие вошли уточненные документы по строительной отрасли, однако и в 2011 г. коллектив высококвалифицированных специалистов констатировал: “некоторые проблемы, в том числе касательно задания сейсмических воздействий с учетом влияния на их интенсивность множества природных факторов, остаются не до конца изученными, а их решения дискуссионными” [25, с. 319].

До сих пор отсутствуют сведения о сейсмических воздействиях на этажах выше 30-го в небоскребах. Это относится и к комплексу “Москва-Сити” с десятью небоскребами. Поведение этих зданий башенного типа на этажах 50–90, на высоте 150–370 м над земной поверхностью, с учетом резонансных явлений оценить простым экстраполированием данных, к тому же скудных, по этажам 10–25, вряд ли возможно. Дело осложняется еще двумя факторами. Во-первых, это скудность небоскребов на ограниченном участке, т.е. близость друг к другу, при вероятных различиях в периодах собственных колебаний каждого

здания. Второе обстоятельство кроется в соотношении величин подземных и надземных частей небоскребов. Так, известно, что самый высокий из них и самый высокий в Европе комплекс “Башня Федерация” занимает площадь один гектар. На этой площадке, на одной платформе, возведены две башни, одна высотой 242 м, 63 этажа, тогда как соседняя, строительство которой только что завершено, имеет 97 этажей наземных при 4-х подземных и общую высоту 374 м. Заглубление, следовательно, определяется примерно в 15 м. В стабильных условиях соотношение надземной и подземной частей 1:20–1:25 считается достаточным, но как будут вести себя соседствующие здания при горизонтальных неравномерных колебаниях, какие нарушения возникнут наверху, и какие изменения произойдут при этом в их подземной среде, предсказать трудно. Учтен ли фактор сейсмических воздействий и в какой степени, неизвестно.

Что может произойти на высоких ярусах зданий. На этажах примерно выше 20-го, с высоты 70–90 м (а единично и на более низких этажах) могут возникать отдельные повреждения за счет сильного бокового раскачивания зданий. Находящиеся выше 10–18 этажей люди могут ощущать беспокойство и страх, и поэтому действовать безотчетно. Впервые испытывающие землетрясение люди, находящиеся выше 15 этажа, способны потерять контроль над собой, поддаться панике, даже если никаких повреждений в помещении не произойдет. В помещениях может возникнуть опасность неконтролируемых утечек воды и газа, разрыва электросетей и загорания, нарушений телефонной связи, даже мобильной, из-за экстремальных перегрузок. В этих условиях предельно затруднены психологическая и медицинская помощь, эвакуация людей и спасательные действия сил МЧС. Чувство опасности и беспомощности дезориентирует людей на высоких этажах, усиливая негативные последствия. Особенно сложной может оказаться ситуация, если событие, одиночное или парное, с цугом последующих колебаний, возникнет в рабочее время, когда плотность людских масс в помещениях центра и соответственно в верхних ярусах зданий очень велика (рис. 5). Да и в ночное время, когда действуют иные факторы, обычно усиливаются эффекты устрашения и беспомощности обитателей.

О тенденции высотного строительства – несколько слов. Утвержденное в 2011 г. крупнейшее приращение городской площади к юго-западу, вплоть до включения в нее территории г. Троицка, – это проблема особого характера,

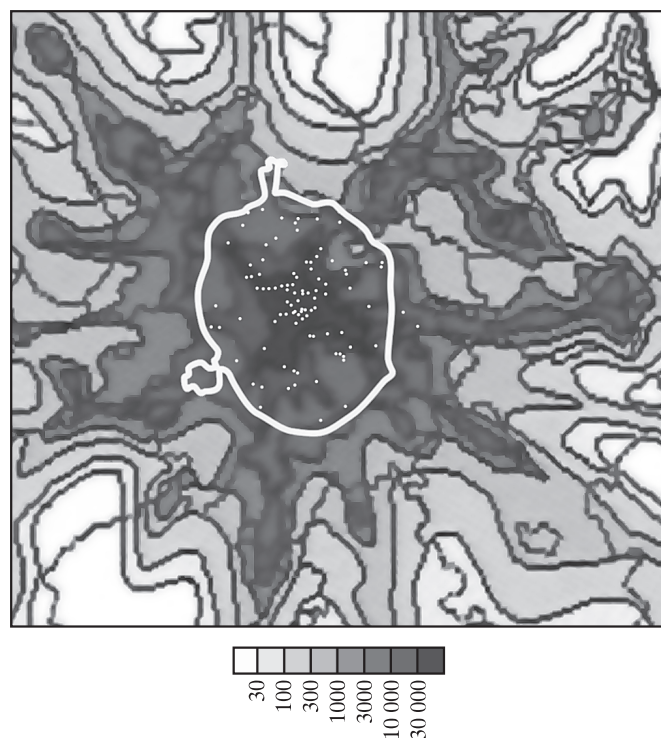


Рис. 5. Картограмма плотности населения Москвы в рабочие часы, чел./км² [3].

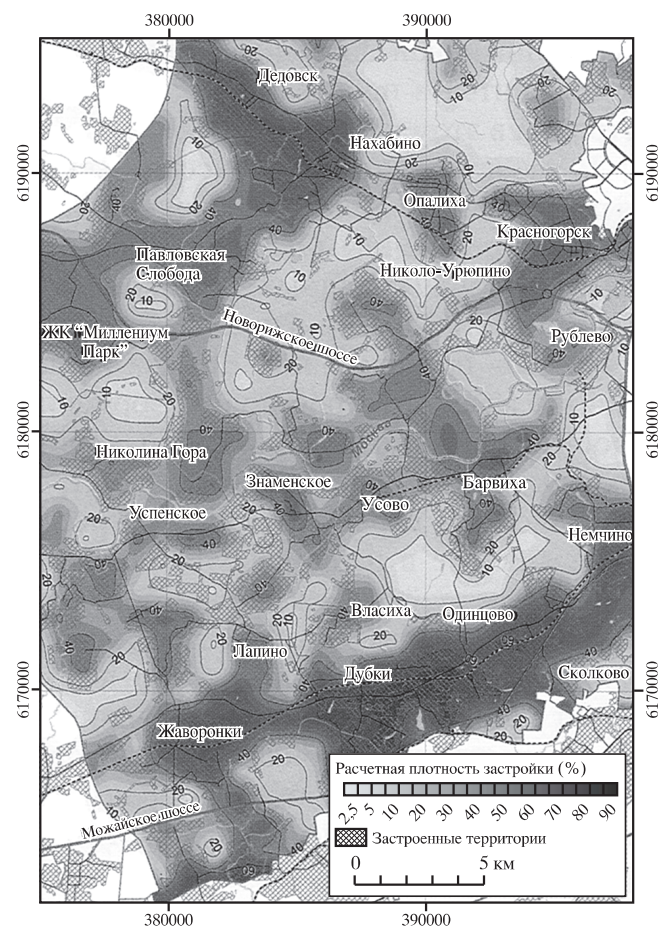


Рис. 6. Карта распределения расчетной плотности застройки в юго-восточном Подмосковье в перспективе [9].

Таблица 5. Доля разновысотных ярусов в жилых высотных комплексах на рынке жилья Москвы и среднего Подмосковья в 2014 г. [26]

Высотный ярус по этажам	Количество комплексов зданий с соответствующим ярусом	%
7–10	47	18
11–16 (17)	95	37
17–24	98	38
25–30	12	5
≥31	3	1
Всего	255	100

требуемая специальной разработки и в обсуждаемом ракурсе [3]. Здесь же обратим внимание на реализуемые планы высотного строительства в пригородах и городах-спутниках Москвы на других направлениях [9] (рис. 6). Тенденция видна, даже если ограничиться объемом только предназначенного на продажу фонда. Как видно из табл. 5, текущий рынок жилья в ближнем и среднем Подмосковье наполовину состоит из помещений на этажах 15-м и выше. Насколько обеспечено такое строительство качественными предварительными изысканиями, надежной документацией по всем направлениям и контролем за исполнением всех норм строительства и эксплуатации высотных зданий – вопрос отдельный, так же как вопрос об информированности населения о возможных сейсмических воздействиях на верхних ярусах домов.

Актуальные рекомендации. Как любой технологический прорыв и новые конструктивные решения, высотное строительство в расширяющемся масштабе, тем более в мегаполисах, порождает новые вызовы в отношении безопасности эксплуатации созданных и возводимых с качественно новыми свойствами сооружений. Как и во многих других сферах деятельности, крупные сооружения взаимодействуют с окружающей средой и меняют ее, причем в отношении как воздействий и изменений постоянных, так и редких, экстремальных. Соответствующее изучение вопроса о воздействиях требует продуманного, системного накопления знаний по кругу специфических показателей, чего до сих пор в отношении сейсмических воздействий не осуществлялось. Инструкция по определению геологических рисков была создана, а подобная в отношении риска сейсмического отсутствует. Решение задачи невозможно без организации специальной службы сейсмометрических наблюдений по конкретной

долгосрочной программе. Разработка таковой потребует долгосрочных усилий специалистов разных направлений, и естественно-научного, и инженерно-технического профиля. В круг мероприятий, насколько показывает опыт предыдущих десятилетий (с весьма скромными результатами), обязательно включение следующих позиций.

1. Создание сети сейсмометрических кластеров в разных частях мегаполиса, в разных геоморфологических и грунтовых условиях, в зданиях разного типа, этажности и разной длительности эксплуатации. Недопустимо, чтобы при следующем Карпатском землетрясении – а оно в XXI в. неминуемо – приборы, даже установленные в высотных зданиях, не работали, как это произошло 2013 г.

2. Необходимым разделом работы службы должна быть подготовка, получение и оперативная обработка опросных сведений по заранее фиксированным адресам, от квалифицированных и/или проинструктированных информаторов, локализованных по проработанной и с налаженной бесперебойной связью сети пунктов.

3. Служба должна иметь научно-методический центр сбора и оперативной обработки информации с регулярной выдачей и обсуждением материалов, а в экстраординарных обстоятельствах – в режиме *on-line*.

4. Постоянная и своевременная систематизация зарубежного опыта, учет достижений и просчетов в высотном строительстве развитых стран с публикацией соответствующих обзоров.

5. В задачи службы могла бы также войти связь с городскими коммунальными организациями, органами МЧС, службами пожарной и скорой помощи, а также выработка мер по противодействию разного рода слухам, нелепым предсказаниям, страшилкам, разработка рекомендаций и специальных инструкций для населения, обучение обитателей и работников верхних этажей правилам поведения в случае сотрясений и психологическая помощь в необходимых случаях.

Неосведомленность, неорганизованность, беспечность обойдутся гораздо дороже. А еще дороже могут обойтись рекламируемые футуристические измышления в расчете на сенсации для доверчивого обывателя о зданиях-трансформерах, с подъемом крыш, поворотом этажей, раздвиганием стен и другими завлекательными выкрутасами (архитектор-футуролог Артур Скижали-Вейс, “задохнувшийся в кольцевой структуре”).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За несколько столетий в Москве не фиксировались сейсмические сотрясения с интенсивностью выше IV–V баллов (по шкале MSK-64, на уровне земли и 2-х первых этажей), но и такие отмечались 2–3 раза только в отдельных районах города. В центре Русской равнины только событие 800-летней давности во Вранчском очаге в Карпатах могло отразиться V-балльными сотрясениями. Фактические данные для допущения сотрясений в IV балла чаще, чем 1 раз примерно в 100–200 лет (на стандартных грунтах, без подтопления), отсутствуют. Вместе с тем надо учитывать, что с ростом в городе высотной застройки и удельного веса высокоэтажных зданий ситуация значительно меняется: интенсивность колебаний (преимущественно горизонтальных) на верхних ярусах нарастает в несколько раз, т.е. гораздо быстрее, чем на этажах средних по сравнению с приземными.

Со времени позднейшего сильного с $M = 6.9 \pm 0.1$ землетрясения во Вранчской очаговой области прошло почти 40 лет; интервалы между сильными событиями в ней укладываются в 30–60 лет, поэтому надо быть готовым к тому, что очередное сильное событие, сотрясения от которого достигнут в той или иной степени Москвы, возникнет до середины XXI в. Уточненная версия каталога самых сильных землетрясений во Вранчском очаге (см. табл. 3) не дает оснований ожидать вскоре события с $M > 6.8$. Тем не менее на высоких ярусах высотных строений эффект колебаний, эквивалентный V–VI и VI–VII баллам, вполне вероятен в ряде районов столицы. Понять ситуацию и наметить вероятности невозможно без: 1) контроля текущего состояния зданий и конструкций, выявления недостатков строительства и эффекта усталости; 2) мониторинга тенденций в изменениях геологической и гидрогеологической среды; 3) дополнительного обсуждения планов и перспектив развития высотного строительства в городе и его окрестностях. При оценках возможных последствий сейсмических колебаний в верхних ярусах строений Москвы было бы неоправданно не учитывать некоторые реализации и тенденции высотного строительства за пределами традиционной части города.

Вопросы обеспечения сейсмической безопасности в городе относятся не только к высотным сооружениям, но и к общей застройке в современном ее состоянии и близком будущем. В 2012 г. общий жилой фонд в столице составлял 218 млн м². Из них 52 млн м² (23%) находились

в неудовлетворительном и ветхом состояниях, т.е. износ определялся в 41% [33, с. 99]. Через 10–12 лет ветхий жилой фонд без реновации может возрасти на 85%. К 2025 г. прогнозируется рост аварийного фонда до 96.4 млн м² [33, с. 101]. Даже на этих примерах должен стать ясным текущий и перспективный масштаб проблемы как в мегаполисе, так в его пригородах.

При настоящей степени изученности вопроса вывод, следующий из ограниченных количественно прямых поэтажных наблюдений, разных теоретических расчетов и единичных инструментальных измерений, формулируется следующим образом. Прямая опасность конструктивных повреждений на высоких ярусах небоскребов отсутствует. Однако проектировщики, строители, эксплуатационники, коммунальные службы и административные органы должны твердо знать, что верхние ярусы высотных домов и особенно небоскребов гораздо более уязвимы к природным сейсмическим воздействиям. Обеспечение безопасности высотных сооружений в рассматриваемом отношении требует особого внимания и мероприятий на всех этапах подготовки и существования высотных зданий. Степень уязвимости высоких ярусов и, главное, их обитателей, и постоянных, и временных, значительно возрастает в силу не только самих воздействий, всегда внезапных, неожиданных, но и за счет крайней затрудненности, практически невозможности оказания своевременной помощи в предаварийных и аварийных ситуациях. Этот, вторичный, фактор может быть более серьезным, чем сами первичные воздействия. Ослабление негативных воздействий может быть осуществлено только предусмотрительностью на ранних стадиях.

Автор благодарен Л.Д. Флейфель за помощь в подготовке рукописи, рецензенту за рекомендации.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 14-05-00776.

Дополнение. В день завершения финальной версии статьи пришло сообщение о глубокофокусном Гиндукушском землетрясении с $M = 7.7$, которое ощущалось на огромном расстоянии, в том числе в городах Новосибирск и Уфа на верхних этажах высотных домов. При прежних подобных Памиро-Гиндукушских землетрясениях такого не происходило, потому что столь высокие дома не строились. Проблема в России становится все более серьезной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базаров А.Д., Черных Е.Н., Цыдыпова Л.Р.* Вейвлет анализ сейсмического воздействия на 9-этажное здание серии 135 143–148 // Матер. Междунар. конф. “Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности”, 23–25 сентября 2015 г. Нерюнгри: Изд-во Технического института СВФУ, 2015. С. 143–148.
2. *Буров М.В.* Проблема взаимодействия современных зданий с исторической застройкой центра г. Москвы // Современные вопросы геологии. Матер. молодежной конф. “2-е Яншинские чтения”. М.: Научный мир, 2002. С. 362–367.
3. *Геоэкологические проблемы новой Москвы.* М.: Медиа-Пресс, 2013. 119 с.
4. *Дорожко А.Л., Макеев В.М., Батрак Г.И., Позднякова И.А.* Геодинамически активные зоны и линейменты Москвы и их геоэкологическое значение // *Геоэкология.* 2015. № 2. С. 147–157.
5. *Егоров Ю.К., Кирилин М.В.* Современные проблемы изучения опасных геологических процессов при изысканиях на территории г. Москвы // Современные проблемы инженерной геодинамики. Тр. конференции. М.: Изд-во МГУ, 2014. С. 48–52.
6. *Жигалин А.Д., Завьялов А.Д., Миндель И.Г., Никонков А.А., Попова О.Г., Рогожин Е.А., Рузайкин А.И., Севостьянов В.В.* Феномен Охотскоморского землетрясения 24 мая 2013 г. в Москве // *Вестник РАН.* 2014. № 7. С. 601–609.
7. *Казакова И.Г., Слинко О.В.* Опасность и характер негативных последствий при подтоплении городов // *Геоэкология.* 1997. № 5. С. 49–59.
8. *Калашников М.А., Потапов И.А., Потапов А.Д., Хоменко В.П.* Современное состояние и направления актуализации действующих рекомендаций по оценке геологических рисков на территории г. Москвы // *Геориск.* 2011. № 3. С. 38–47.
9. *Конфетков М.Н.* Методика картографирования плотности застройки пригородных районов по космическим снимкам высокого разрешения (на примере западного Подмосковья) // *Геодезия и картография.* 2014. № 10. С. 16–24.
10. *Маловичко А.А., Маловичко Е.А.* Макросейсмические проявления в Москве от глубокофокусного землетрясения 24 мая 2013 г. в Охотском море // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Матер. Восьмой Междунар. сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 3–9.
11. *Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов Б.В.* Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // *Геофизические исследования.* 2015. Т. 16. № 3. С. 31–42.
12. *Медведев С.В.* О последствиях карпатских землетрясений 1940 г. // *Тр. Геофизического ин-та АН СССР.* 1948. № 1(128). С. 74–79.
13. *Москва. Геология и город / Под ред. В.И. Осипова и О.П. Медведева.* М.: Моск. учебники и картолитология, 1997. 400 с.
14. *Никонков А.А.* Землетрясения: прошлое, настоящее, прогноз. М.: Знание, 1984. 192 с.
15. *Никонков А.А.* Сейсмические сотрясения на Русской равнине в XI–XVII вв. // *Изв. АН СССР. Сер. физика Земли.* 1990. № 11. С. 85–95.
16. *Никонков А.А.* Сильнейшее в Восточной Европе Карпатское землетрясение 26 октября 1802 г.: новые материалы и оценки // *Доклады РАН.* 1996. Т. 347. № 1. С. 99–102.
17. *Никонков А.А.* Землетрясения в столице // *Природа.* 1997. № 9. С. 76–84.
18. *Никонков А.А.* Сильные землетрясения в Москве: возможны ли они? // *Наука в России.* 1997. № 5. С. 30–31.
19. *Никонков А.А.* Подземные опасности Москвы // *Природа.* 2003. № 6. С. 63–69.
20. *Никонков А.А.* Макросейсмические эффекты Карпатских глубокофокусных землетрясений в Москве – исторические уроки // *Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и Московской области.* Обнинск: ГС РАН, 2012. С. 70–77.
21. *Никонков А.А.* Новый этап познания сейсмичности Восточно-Европейской платформы и ее обрамления // *Докл. РАН. Сер. геофизика.* 2013. Т. 450. № 4. С. 465–469.
22. *Никонков А.А.* К оценке сейсмических воздействий от удаленных глубокофокусных землетрясений на высоких этажах зданий Москвы // *Сергеевские чтения.* Вып. 17. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы городских агломераций. М.: РУДН, 2015. С. 282–287.
23. *Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г.* М.: Наука, 1977. 536 с.
24. *Рекомендации по оценке геологического риска на территории г. Москвы.* М.: Изд-во ГУП НИАЦ, 2002. 49 с.
25. *Севостьянов В.В., Миндель И.Г., Трифонов Б.А., Рагозин Н.А., Шпекторова О.А.* Сейсмическое микрорайонирование территории г. Москвы для высотного строительства // *Геоэкология.* 2011. № 4. С. 319–327.
26. *Сейсмологические наблюдения на территории Москвы и Московской области // Матер. научн. конф. / Отв. ред. А.А. Маловичко.* Обнинск: ГС РАН, 2012. 176 с.
27. *Татевосян Р.Э.* Проблема однородной магнитудной классификации сейсмических событий и оценка периодов повторяемости глубоких карпатских зем-

- летрясений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 3. С. 5–13.
28. Татевосян Р.Э., Косарев Г.Л., Быкова В.В., Мацевский С.А., Уломов В.И., Аптекман Ж.Я., Вакарчук Р.Н. Глубокофокусное землетрясение с $M_w = 8.3$, ощущавшееся на расстоянии 6500 км // Физика Земли. 2014. № 3. С. 154–162.
 29. Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г. Использование современного сейсмического события для оценки магнитуды исторического землетрясения: глубокофокусное Карпатское землетрясение 26 октября 1802 года // Физика Земли. 2004. № 6. С. 14–25.
 30. Уломов В.И. Отзвуки дальних землетрясений в Москве // Земля и Вселенная. 2006. № 3. С. 102–106.
 31. Уломов В.И. О сейсмических воздействиях на высотные здания и сооружения г. Москвы // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 2. С. 62–65.
 32. Уломов В.И. Прогноз сейсмических проявлений в Москве при землетрясениях в зоне Вранча // Физика Земли. 2010. № 1. С. 3–20.
 33. Экоград (журнал). 2014. № 7.
 34. Shebalin N.V., Leydecker G. Earthquake catalogue of the former Soviet Union and borders up to 1988. Luxembourg. 1997. 134 p.
- REFERENCES
1. Bazarov, A.D., Chernykh, E.N., Tsydypova, L.R. [Wavelet analysis of seismic impact on a nine-storey building series 135] *Mat. Mezhdun. konf. "Geologo-geofizicheskaya sreda I raznoobraznye proyavleniya seismichnosti"*, 23–25 sentyabrya 2015 g. [Proc. Intern. Conf. "Geological and geophysical environment and diverse manifestations of seismicity", September 23–25, 2015], Neryungri, Izd. Tekhn univ. SVFU, 2015, pp. 143–148 (in Russian).
 2. Burov, M.V. [Problems of interaction between modern and historical buildings in the center of Moscow]. *Sovremennye voprosy geologii. Mater. Molodezhn. Konf. "2e Yanshinskie chteniya"* [Actual issues in geology. Proc. young professionals conf. "Second Yanshin's readings"]. Moscow, Nauchnyi mir, 2002, pp. 362–367 (in Russian).
 3. *Geoekologicheskie problemy novoi Moskvy* [Geoecological problems of new Moscow]. Moscow, Media-press, 2013, 119 p. (in Russian).
 4. Dorozhko, A.L., Makeev, V.M., Batrak, G.I., Pozdnyakova, I.A. [Geodynamically active zones and lineaments in Moscow and their environmental role]. *Geoekologiya*, 2015, no. 2, pp. 147–157 (in Russian).
 5. Egorov, Yu.K., Kirin, M.V. [Current problems in geohazard study upon survey in the Moscow territory]. *Trudy konf. "Sovremennye problemy inzhenernoi geodinamiki"* [Proc. Conference "Current Problems in engineering geodynamics"]. Moscow, Mosk. Gos. Univ., 2014, pp. 48–52 (in Russian).
 6. Zhigalin, A.D., Zav'yalov, A.D., Mindel', I.G., Nikonov, A.A., Popova, O.G., Rogozhin, E.A., Ruzaikin, A.I., Sevost'yanov, V.V. [The phenomenon of the Okhotsk Sea Earthquake in Moscow on May 24, 2013], *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*, 2014, vol. 84, no. 7, pp. 601–609 (in Russian).
 7. Kazakova, I.G., Slinko, O.V. [Danger and character of negative effects upon the ground-water level rise in towns]. *Geoekologia*, 1997, no. 5, pp. 49–59 (in Russian).
 8. Kalashnikov, M.A., Potapov, I.A., Potapov, A.D., Khomenko, V.P. [State-of-art and tendencies in updating the acting recommendations for geological risks evaluation in Moscow territory]. *Georisk*, 2011, no. 3, pp. 38–47 (in Russian).
 9. Konfektov, M.N. [Methodology of mapping the construction density in suburb areas using the high resolution space images (by the example of western Moscow region)]. *Geodeziya i kartografiya*. 2014, no. 10, pp. 16–24 (in Russian).
 10. Malovichko, A.A., Malovichko, E.A. [Macroseismic effects in Moscow caused by the deep-focus earthquake on May 24, 2013 in the Okhotsk Sea]. *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Mater. VIII Mezhdunar. Seismologicheskoi shkoly* [Contemporary methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. XIII International Workshop in Seismology]. Obninsk, Geophysical Survey, 2013, pp. 3–9 (in Russian).
 11. Marchenkov, A.Yu., Kapustyan, N.K., Smirnov, B.V. [Experience in registration of seismic impact on the high-rise building of Moscow University]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 31–42 (in Russian).
 12. Medvedev, S.V. [About the consequences of Carpathian earthquakes in 1940]. *Trudy Geofizicheskogo in-ta AN SSSR* [Proceedings of the Geophysical Institute Acad. Sci. of the USSR]. 1948, no. 1 (128), pp. 74–79 (in Russian).
 13. *Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and the city] Osipov, V.I., Medvedev, O.P., Eds. Moscow, Mosk. uchebniki i kartolitografiya, 1997, 400 p. (in Russian).
 14. Nikonov, A.A. *Zemletryaseniya: proshloe, nastoyashchee, prognoz*. [Earthquakes: past, present, and forecast]. Moscow, Znanie, 1984, 192 p. (in Russian).
 15. Nikonov, A.A. [Seismic shakes at the Russian Plane in XI–XVII centuries]. *Izvestiya AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 1990, no. 11, pp. 85–95 (in Russian).
 16. Nikonov, A.A. [The strongest Carpathian Earthquake on October 26, 1802 registered in the Eastern Europe: new data and estimations]. *Doklady Akademii Nauk*, 1996, vol. 347, no. 1, pp. 99–102 (in Russian).

17. Nikonov, A.A. [Earthquakes in the capital]. *Priroda*, 1997, no. 9, pp. 76–84 (in Russian).
18. Nikonov, A.A. [Strong earthquakes in Moscow: are they possible?]. *Nauka v Rossii*, 1997, no. 5, pp. 30–31 (in Russian).
19. Nikonov, A.A. [Subsurface hazards in Moscow]. *Priroda*, 2003, no. 6, pp. 63–69 (in Russian).
20. Nikonov, A.A. [Macroseismic effects in Moscow caused by Carpathian deep-seated earthquakes – historical lessons]. *Seismologicheskie nablyudeniya na territorii Moskvy i Moskovskoi oblasti* [Seismological observations in the territory of Moscow and Moscow oblast]. Obninsk, GS RAN, 2012, pp. 70–77 (in Russian).
21. Nikonov, A.A. [A new stage in understanding seismicity of the East European Platform and its margins]. *Doklady Akademii Nauk*, 2013, vol. 450, no. 4, pp. 465–469 (in Russian).
22. Nikonov, A.A. [To the assessment of seismic excitations caused by distant deep-seated earthquakes on high storeys of Moscow buildings]. *Sergeevskie chteniya. Vyp. 17. Inzhenerno-geologicheskie i geoekologicheskie problemy gorodskikh aglomeratsii* [Sergeev's readings. Issue 17. Engineering geological and geoecological problems in urban agglomerations]. Moscow, RUDN Publ., 2015, pp. 282–287 (in Russian).
23. *Novyi katalog sil'nykh zemletryasenii na territorii SSSR s drevneishikh vremen do 1975 g.* [A new catalogue of strong earthquakes in the USSR territory since ancient times till 1975]. Moscow, Nauka, 1977, 536 p. (in Russian).
24. *Rekomendatsii po otsenke geologicheskogo riska na territorii g.Moskvy* [Recommendations on seismic risk evaluation in Moscow territory]. Moscow, GUP NIATS, 2002, 49 p. (in Russian).
25. Sevost'yanov, V.V., Mindel, I.G., Trifonov, B.A., Ragozin N.A., Shpektorova, O.A. [Seismic microzon-
ning of Moscow area for the purpose of high-rise construction]. *Geoekologiya*, 2011, no. 4, pp. 319–327 (in Russian).
26. *Seismologicheskie nablyudeniya na territorii Moskvy i Moskovskoi oblasti* [Seismic observations in Moscow and Moscow area]. *Mater. konferentsii* [Conference Proc.]. Ed. Malovichko, A.A. Obninsk, GS RAN, 2012. 176 p. (in Russian).
27. Tatevossian, R.E. [Problems in uniform magnitude classification of seismic events and recurrence time assessment of the deep Carpathian earthquakes]. *Voprosy inzhenernoi seismologii*, 2008, vol. 35, no. 3, pp. 5–13 (in Russian).
28. Tatevossian, R.E., Kosarev, G.L., Bykova, V.V., Matsievskii, S.A., Ulomov, I.V., Aptekman, Zh.Ya., Vakarchuk, R.N. [A deep-focus earthquake with $M_w = 8.3$ felt at a distance of 6500 km]. *Fizika Zemli*, 2014, vol. 50, no. 3, pp. 453–461 (in Russian).
29. Tatevossian, R.E., Mokrushina, N.G. [The use of a contemporary seismic event for historical earthquake magnitude estimation: the deep Carpathian earthquake on October 26, 1802]. *Fizika Zemli*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 465–476 (in Russian).
30. Ulomov, V.I. [Echoes of distant earthquakes in Moscow]. *Zemlya i Vselennaya*, 2006, no. 3, pp. 102–106 (in Russian).
31. Ulomov, V.I. [About seismic impact on high-rise buildings and engineering structures in Moscow]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*, 2008, no. 2, pp. 62–65 (in Russian).
32. Ulomov, V.I. [Prediction of seismic manifestations in Moscow produced by Vrancea Earthquakes]. *Fizika Zemli*, 2010, no. 1, pp. 3–20 (in Russian).
33. *Ekograd*. 2014. No. 7 (in Russian).
34. Shebalin, N.V., Leydecker, G. Earthquake catalogue of the former Soviet Union and borders up to 1988. Luxembourg. 1997. 134 p.

TO THE ASSESSMENT OF SEISMIC IMPACT PRODUCED BY DISTANT DEEP-FOCUSED EARTHQUAKES ON HIGH-RISE BUILDINGS IN MOSCOW

A. A. Nikonov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
B. Gruzinskaya ul. 10, Moscow, 123242 Russia. E-mail: nikonov@ifz.ru*

The vulnerability of high-rise buildings and skyscrapers to seismic impact is discussed in different aspects by the example of Moscow. The following basic topics are concerned: 1) the main changes in geoenvironment caused by high-rise buildings construction, 2) systematization and analysis of effects observed at high floors in the city, 3) assessment of observed and possible maximal excitations at high floors, as well as the seismic impact recurrence according to the revised catalogue version; 4) adequate estimations of seismic risk in view of the trend to broadening sky-scraper construction, and 5) some proposals for future research and arrangement of special survey.

The types and intensities of seismic impacts in megacities caused by distant seismic sources are considered by some historical examples, and, in particular, by the data collected recently for two latest distant strong seismic events on 3.IV.1977, the Vrancea earthquake on 04.03.1977, and the Okhotomorsk earthquake on 24.05.2013. The results of unique instrumental measurements in the multi-storey building of the Moscow University at Vorob'evy Hills are also provided. According to all the available data, the seismic effect is growing slightly up to 10–14 storeys, it becomes considerably stronger at the storeys higher than 16–20 and, the more so, at the floors higher than 20–25, e.g., higher than 70–90 m above surface. Some additional features are considered to be taken into account the also. The maximal seismic intensity caused by the critical deep-focus earthquakes in the Vrancea zone (Carpathians) is assessed in Moscow, as well as the recurrent intervals of vibrations in the city. Occurrence of a strong earthquake in the Vrancea zone is very likely during the XXI century. There is no seismic risk in Moscow, however, some features of rare seismic excitations can be traced by the disturbance of normal operation in high-rise buildings, producing certain instability of equipment and inhabitants. The main factors and tendencies, which should be taken into consideration for the assessment and minimization of future shaking effect for high-rise buildings in the capital and its suburbs, are emphasized. Some proposals concerning the actual research, organization of specific survey in order to minimize possible negative effects are also outlined.

Keywords: *Moscow city, seismic shaking, skyscrapers, high-rise building stability, macroseismic data, seismic excitations, recurrence of seismic events, recurrence intervals of seismic vibrations, Vrancea seismic source, the Vrancea earthquake 04.03.1977, the Okhotomorsk earthquake 24.05.2013, geological risks, alteration of ground conditions.*