

УДК 550.34

ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОТНОЕ ЗДАНИЕ МГУ

© 2015 г. А.Ю. Марченков¹, Н.К. Капустян², В.Б. Смирнов^{1,2}

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

Сейсмометрический мониторинг колебаний высотного главного здания Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) на Воробьёвых горах проводится с 2010 г. по настоящее время. Используемое при мониторинге оборудование аналогично применяемому в сети Геофизической службы РАН. Для записи колебаний сооружения внутри него на разной высоте размещено 13 трёхкомпонентных сейсмостанций с рабочей частотой 0.02–50 Гц; синхронизация записей осуществляется с использованием GPS.

Сопоставлены амплитуды зарегистрированных на разных высотных отметках колебаний, связанных с сейсмическими и ветровыми воздействиями, и аналогичные данные прошлых лет, а также доступные сведения о колебаниях, фиксируемых на других высотных сооружениях. Установлены частоты собственных колебаний главного здания и шпиля МГУ; прослежены изменения частоты собственных колебаний последнего при изменении нагрузки в связи с обледенением конструкции во время “ледяного дождя” в 2010 г.

Проанализированы колебания главного здания МГУ, вызванные воздействием сейсмических волн от удаленного землетрясения, произошедшего с $M=8.4$ в Охотском море 24.05.2013 г. Для изучения реакции высотного сооружения на сейсмические воздействия проведено сопоставление сейсмограмм, записанных на разных высотах внутри него.

Сделаны выводы методического характера, касающиеся измерительных возможностей используемой системы наблюдений; отмечена необходимость создания расчётных моделей, позволяющих использовать экспериментальные данные для определения текущего состояния сооружения.

Ключевые слова: сейсмические воздействия; мониторинг зданий; сейсмологические наблюдения; моделирование.

Введение

Главное здание Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ) на Воробьёвых горах относится к сооружениям первого этапа высотного строительства, проводимого в Москве в 1950-е годы. Здание имеет треугольный силуэт; квадратная в плане центральная высотная часть здания отсечена от крыльев меньшей этажности деформационными швами (рис. 1). Основой несущих конструкций наиболее высокой центральной части служит стальной каркас. Обращают на себя внимание две особенности этого сооружения, первая из которых важна для понимания закономерностей износа конструкций. Она состоит в том, что до настоящего времени не только не реконструировалось само здание, но не менялась и окружающая его застройка, т.е. ни сама конструкция, ни её основание не подвергались искусственным изменениям. Вторая особенность связана с тем, что главное здание МГУ с момента начала его возведения до середины 70-х годов прошлого столетия тщательно обследовалось, в первую очередь, благодаря усилиям проф. И.Л. Корчинского [1953]. К сожалению, результаты мониторинга колебаний здания оказались утраченными.

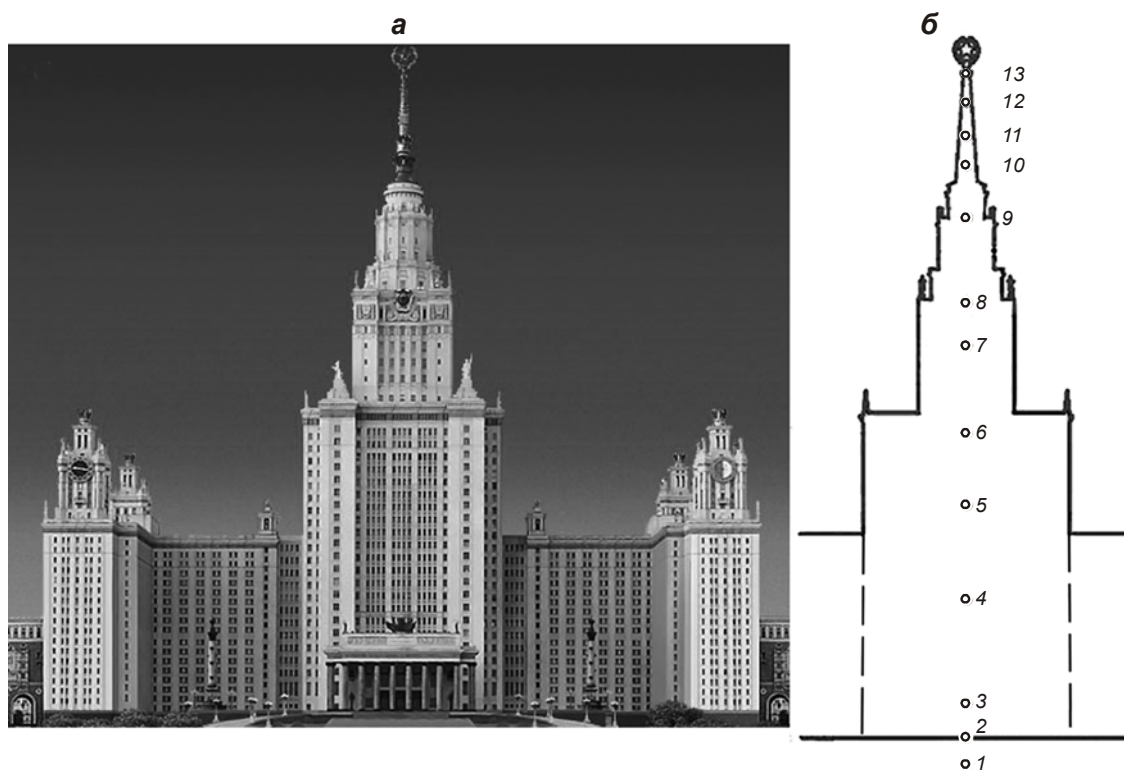


Рис. 1. Общий вид главного здания МГУ им. М.В. Ломоносова (а) и схема расположения пунктов сейсмометрического мониторинга внутри него (б). 1–13 – номера пунктов наблюдения; штриховые линии – деформационные швы между высотной частью здания и его крыльями

В связи с возрождением высотного строительства в Москве в последние годы было выполнено инструментальное сейсмометрическое обследование состояния конструкций главного здания МГУ с целью выявления изменений за полвека эксплуатации. Измерительная аппаратура размещалась в тех же точках, что и при мониторинге, проводимом профессором И.Л. Корчинским. Полученные сейсмические записи позволили измерить частоты собственных колебаний обследуемого высотного сооружения [Вознюк, Капустян, Марченков, 2006].

С середины 2010 г. мониторинг колебаний в главном здании МГУ ведется с применением аппаратуры, аналогичной используемой Геофизической службой РАН на сети сейсмостанций. Непрерывные наблюдения осуществляются при участии студентов физического факультета МГУ, специализирующихся в сейсмологии. Данные наблюдений служат для получения детальных сведений о работе конструктивных элементов сооружения при воздействиях разных типов (ветровых, сезонных, импульсных и др.).

Надо отметить, что в Москве ощутимые сейсмические воздействия, создаваемые землетрясениями, как правило, наблюдаются редко и связаны в основном с событиями в зоне Вранча (Румыния). Поэтому любое зарегистрированное сильное землетрясение важно для детального анализа колебаний зданий. Кроме того, при регистрации волн от землетрясений появляется возможность сопоставления сейсмических воздействий с воздействиями других динамических нагрузок. 24.05.2013 г. в 05:44:49 по Гринвичу в Охотском море произошло сильное землетрясение, вызвавшее заметные колебания главного здания МГУ. Магнитуда события составила 8.4, глубина очага – 600 км, эпицентральное расстояние – 6400 км, азимут – 323°. По существу, это землетрясение – первое сильное сейсмическое событие, зарегистрированное на высотном здании, к тому же не в одном, а в нескольких пунктах в его теле. Детальный анализ полученных записей важен для решения вопросов, связанных с расчетом сейсмостойкости высотных сооружений.

Схема наблюдений и использованная аппаратура

Датчики установлены в 13 пунктах наблюдения, распределённых по вертикальной оси здания от его подземной части до шпиля (см. рис. 1); конкретные данные о местоположении каждого из пунктов 1–13 приведены в таблице.

Характеристика пунктов сейсмометрического мониторинга в главном здании МГУ

Пункт наблюдения	Часть сооружения	Местоположение	Высота (отм.), м	Записи, использованные для анализа землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г.
1	Подземная часть здания	–	–20.15	–
2		–	–11.85	–
3	Тело здания	эт. 1	0.00	Z-, X-, Y-компоненты
4		эт. 11	36.75	–
5		эт. 17	70.35	Z-, X-, Y-компоненты
6		эт. 23	95.56	Z-, X-, Y-компоненты
7		эт. 28	126.35	Z-, X-, Y-компоненты
8		эт. 31	148.80	Z-, Y-компоненты
9		эт. 35	171.81	–
10	Шпиль	–	190.16	–
11		–	200.80	–
12		–	212.08	–
13		–	222.86	Z-, X-, Y-компоненты

Пункты 1–9, расположенные в подземной части здания и в его теле, оборудованы велосиметрами СМ-3ОС (ГС РАН) с рабочим диапазоном частот измерительной аппаратуры 0.02–20 Гц; пункты 10–13, находящиеся в шпице, – акселерометрами АС-63 (GeoSIG) с рабочим диапазоном частот 0.1–50 Гц. Оба диапазона включают частоты первых мод собственных колебаний высотного здания и его шпиля, перекрывая спектры прочих природных и техногенных источников, оказывающих воздействие на сооружение. Во всех пунктах регистрировались три компонента – вертикальная (*Z*) и две горизонтальные (*X*, *Y*), ориентированные вдоль и поперек фасада (азимут оси *Y* – 225°). Все записи синхронизованы сигналом GPS.

Для анализа воздействия сейсмических волн от землетрясения в Охотском море использовались трехкомпонентные записи, полученные на п.п. 3, 5, 6, 7, 13, и двухкомпонентная запись на п. 8, расположенном на эт. 31 (см. таблицу).

Исследуемые параметры колебаний высотного здания

В качестве основных параметров, характеризующих колебания главного здания МГУ, рассматривались частоты собственных колебаний сооружения, соотношение амплитуд колебаний на разных высотных отметках, зависимость амплитуды колебаний от параметров воздействий (скорости ветра, температуры и т.д.)

На рис. 2, а представлена статистика значений частотных пиков в спектре регистрируемых шумов – процент (от общего количества обработанных записей шума) присутствия пика в спектре записи в точке наблюдения.

Приведенный график и подобные ему позволяют выбрать значения собственных колебаний из набора пиков в спектрах, если нет возможности анализа фазовых

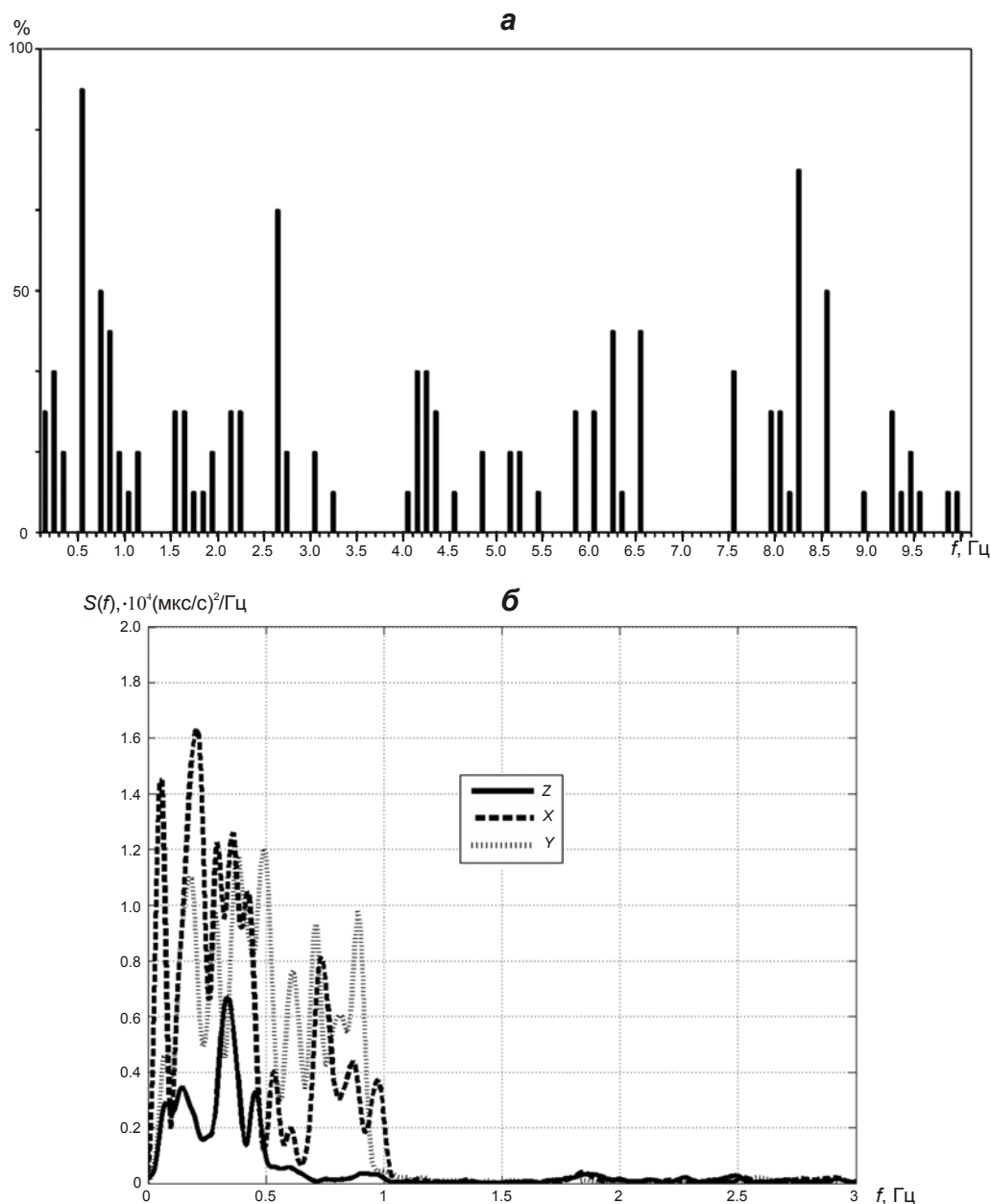


Рис. 2. Характеристики колебаний главного здания МГУ. Гистограмма повторяемости появления на записях пиков с частотами, обозначенными на оси абсцисс (а), и спектры мощности Z-, X-, Y-компонент записей землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г., полученных на первом этаже главного здания (б)

соотношений записей, как это сделано, например, в [Еманов и др., 1988]. По расчетным оценкам колебаний конструкций, первой моде собственных колебаний соответствуют частоты около 0.5 Гц [Корчинский, 1953]. Обращает на себя внимание устойчивое присутствие пиков спектра на более низких частотах вплоть до периода 50 с (0.02 Гц). Причем эти колебания регистрируются не только в главном здании, но и на постаменте в подвале здания физического факультета на расстоянии 300 м. Отметим, что подобный эффект наблюдался ранее и на другом высотном здании в Москве – “Башне–2000” [Капустян et al., 2013].

На рис. 2, б представлены спектры мощности колебаний, связанных с землетрясением в Охотском море 24.05.2013 г. Спектры рассчитаны по интервалу между вступле-

ниями P - и S -волн в пункте на первом этаже главного здания. Здесь также видны резонансные пики на низких частотах; причем они присутствуют на X - и Z - компонентах, а на Y -компоненте, ориентированной перпендикулярно к крыльям главного здания, их нет. Возможно, так проявляются совместные колебания здания и всей массы его крыльев, связанных общим основанием, однако это предположение требует дополнительных исследований с учётом присоединенной массы грунтов.

Значения частоты первой моды собственных колебаний разных частей главного здания для рассматриваемого временного интервала имеют следующие значения:

тело здания – для X -компоненты $f=0.47$ Гц, для Y -компоненты $f=0.52$ Гц;

шпиль – по обоим горизонтальным компонентам $f=0.76$ Гц.

В спектрах Z -компонент все указанные частоты прослеживаются для набора отметок по высоте; в спектрах записей землетрясения 24.05.2013 г. на первом этаже они присутствуют в виде резонансных пиков.

Отклик здания на погодные воздействия

При анализе временных вариаций частот в процессе мониторинга прослеживается их некоторая сезонная изменчивость, что согласно расчетам может быть связано с температурной деформацией конструкций. Аналогичный эффект отмечался и на высотном здании “Эдельвейс” в Москве [Karpustian *et al.*, 2013].

В зависимости от ветровой нагрузки на здание при изменении скорости ветра от 1 до 10 м/с амплитуды собственных колебаний варьируют от 130 до 180 мкм (смещения на уровне п. 8 на эт. 31) (рис. 3). Просматривается тесная связь временных рядов – коэффициент корреляции значения скорости ветра и амплитуд всех частот собственных колебаний составляет не менее 0.95.

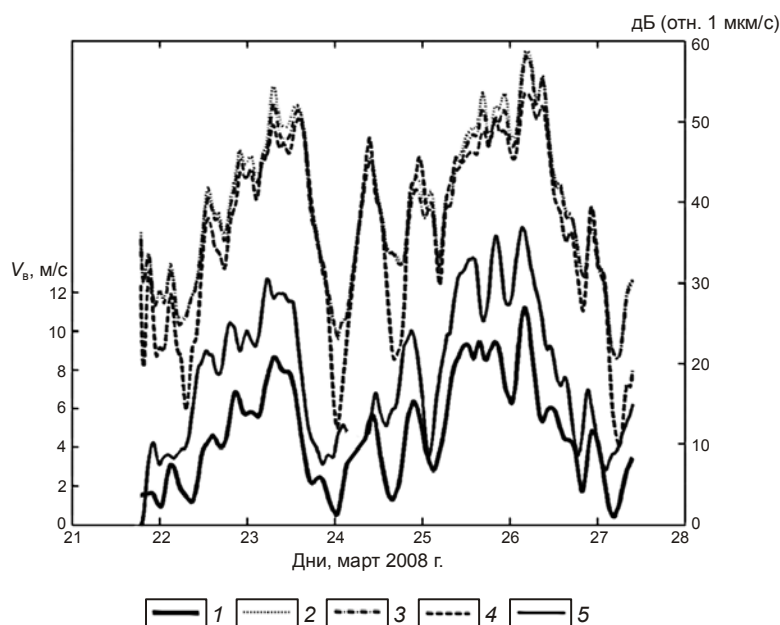


Рис. 3. Графики изменения во времени скорости ветра и амплитуд колебаний главного здания МГУ на основных собственных частотах сооружения. Период наблюдений – 21–28 марта 2008 г.; компонента Y

1 – изменение скорости ветра, $V_{в}$, м/с (шкала слева); 2–5 – изменение амплитуд колебаний здания МГУ, дБ (шкала справа) на частотах 0.47 Гц (2), 0.52 Гц (3), 0.76 Гц (4), 0.026 Гц (5)

Обратим внимание на два факта. Во-первых, временной ход длиннопериодных колебаний (0.026 Гц) подобен ходу прочих частот собственных колебаний и ветровых воздействий, что указывает на их связь. Существенно, что в колебаниях участвуют не только надземные конструкции, но и подземная часть сооружения, возможно, с присоединенным грунтом основания, причем вся система характеризуется нежестким закреплением в основании. Во-вторых, полученные результаты противоречат выводу И.Л. Корчинского о том, что амплитуда колебаний в проведенном им эксперименте не связана со скоростью ветра [Корчинский, 1953]. Возможной причиной этого может быть принятый в эксперименте Корчинского способ измерения скорости ветра непосредственно вблизи стен, где важную роль играют эффекты обтекания главного здания ветровым потоком. Фактически, И.Л. Корчинский анализировал быстрые вариации скорости ветра, так называемые микрометеорологические пульсации.

Нами использовались данные метеостанции физического факультета МГУ, регистрирующей метеопараметры для свободной атмосферы на высоте около 250 м в широком диапазоне частот. Хорошая корреляция кривых временного хода скорости ветра и амплитуд колебаний здания (см. рис. 3) позволяет утверждать, что здание реагирует на медленные (в несколько часов) вариации, не отслеживая более быстрых. Однако влияние пульсаций требует дополнительного изучения, так как при ветровых воздействиях свою роль может играть взаимодействие конструкции в целом с ее элементами (козырьками, навесными и пр.). Тем не менее, полученный результат экспериментально подтверждает представление о том, что в сейсмичных районах именно ветровые нагрузки на высотные здания – основной и постоянный источник их колебаний [Николаев, 2005].

Была проанализирована также реакция высотного здания на “ледяной дождь” в конце 2010 г., проявившаяся в изменении частоты собственных колебаний шпиля главного здания. На спектрально-временной диаграмме (рис. 4) отчетливо видно уменьшение частоты от 0.76 до 0.68 Гц, произошедшее в течение двух суток, по прошествии которых частота постепенно начала возвращаться к первоначальным значениям.

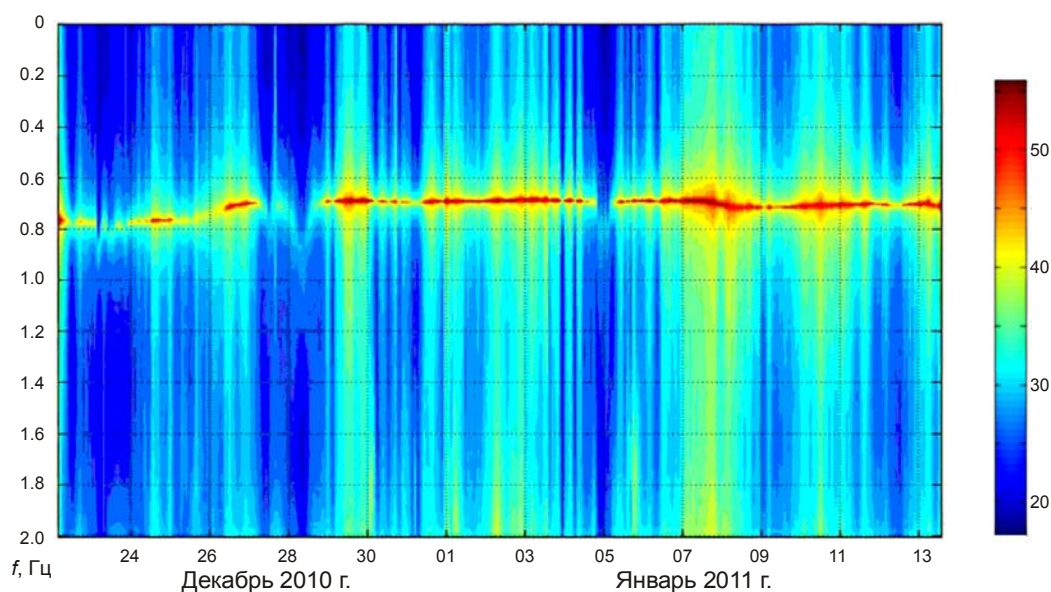


Рис. 4. Спектрально-временная диаграмма колебаний высотного здания МГУ в направлении X на уровне эт. 28 (п. 7). Время GMT, начало отсчета – 22 декабря 2010 г., 00:00:00; цветовая шкала – дБ относительно смещения в 1 мкм

Наблюдаемое уменьшение частоты собственных колебаний шпиля объясняется увеличением его массы вследствие налипания льда. Принимая, что $T^2 \approx m$, где T – период собственных колебаний шпиля, m – его масса, и полагая малыми изменения упругих модулей системы при обледенении, для названных выше значений частот получаем оценку увеличения массы шпиля в размере 5 % от основной массы. Эту экспериментальную оценку следует учитывать при расчете шпилей высотных зданий для обеспечения безопасности конструкций в экстремальных ситуациях.

Сейсмическое воздействие землетрясения в Охотском море 24 мая 2013 г.

Были сопоставлены записи волн от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г., зафиксированные в трех приповерхностных точках, расположенных в разных местах на территории МГУ – в главном здании, в зданиях физического факультета и Фундаментальной библиотеки. Максимальный разнос точек составлял около 500 м. Обнаружилось почти полное подобие записей, вплоть до особенностей рисунка волновых форм, что относится, в первую очередь, к записям P -волны в первых вступлениях (рис. 5). Это позволяет уверенно утверждать, что для точек внутри главного здания различия в записях будут определяться особенностями распространения сигнала по конструкциям сооружения и локальными шумами.

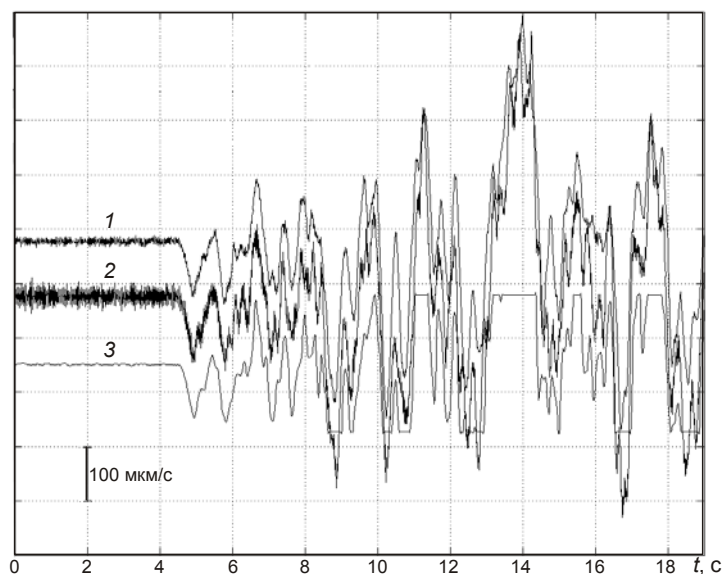


Рис. 5. Записи Z -компонент вступлений P -волн от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г., зафиксированных в приповерхностных точках, расположенных на первом этаже главного здания МГУ (1), постаменте здания физического факультета (2) и основании здания Фундаментальной библиотеки (3)

Динамическая нагрузка, создаваемая волнами разных типов от сильного глубокофокусного землетрясения, по-разному проявилась в параметрах колебаний в разных точках главного здания МГУ. Эти различия отмечаются не только по высоте, так и по осям здания.

Примеры Z - и Y -компонент сейсмограмм, зарегистрированных на разных высотных отметках от 0.00 до 95.55 м в п.п. 3, 5, 6, в которых горизонтальные сечения сооружения одинаковы (см. рис. 1, б), приведены на рис. 6.

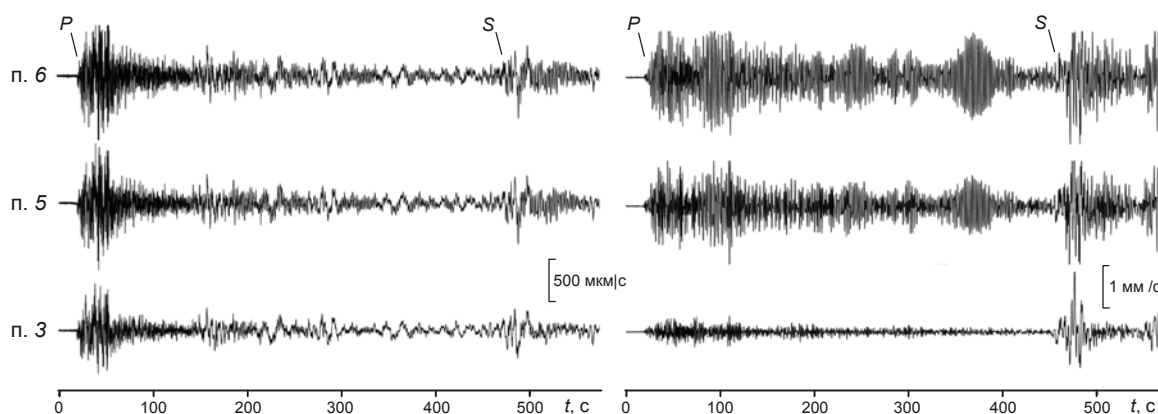


Рис. 6. Записи Z -компонент (слева) и Y -компонент (справа) P - и S -волн от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г., выполненные в пунктах наблюдения на разных высотных отметках в главном здании МГУ

С точки зрения методологии измерений кинематических параметров сейсмического сигнала, следует отметить, что записи вертикальной компоненты в этой части здания подобны, что дает возможность использовать фазовую корреляцию как дополнительный критерий для выделения волн. Приведенный пример позволяет утверждать, что вопреки существующему мнению, установка сейсмометров в теле массивного сооружения практически не искажает кинематические характеристики волновых полей (времена вступлений). Это может оказаться важным при проведении сейсмологического мониторинга района размещения объекта – сейсмограммы с датчиков, расположенных непосредственно на объекте, могут быть использованы для локализации эпицентра событий. Учет отмеченного факта важен также при выборе мест размещения датчиков в теле крупных сооружений, например, плотин ГЭС, при проведении их мониторинга.

Рассмотрим особенности изменения волновых форм регистрируемых колебаний. Отметим, что записи горизонтальной компоненты, в отличие от вертикальной, содержат мощную и относительно высокочастотную “наводку”, амплитуда которой увеличивается с ростом высоты точки регистрации. “Наводка” монохроматическая, частота составляет 0.76 Гц, что соответствует частоте собственных колебаний шпиля.

На рис. 7 приведены развертки записей Y - и Z -компонент вблизи вступления P -волны на п. 8 (эт. 31, отм. 148.80 м) и п. 13 (шпиль, отм. 222.86 м). Существенное различие частотного состава компонент очевидно; обращает на себя внимание наличие на п. 8 колебаний с видимой частотой 1.1 Гц. Отметим, что эти частоты не являются доминирующими в спектрах записей землетрясений на первом этаже (см. рис. 2), т.е. это одна из мод собственных колебаний. В колебаниях шпиля названная частота также прослеживается, но в суперпозиции с более высокочастотными колебаниями около 4 Гц.

Можно также видеть наличие всплесков амплитуд колебаний шпиля – монохроматические цуги с видимой частотой 1.33 Гц, появляющиеся на записи, например, спустя 50 с после вступления P -волны (см. рис. 7, справа, п. 13). Амплитуды колебаний в монохроматических цугах в горизонтальной плоскости примерно в три раза больше, чем в вертикальной. Их проявление не совпадает по времени с вступлениями интенсивных фаз колебаний от землетрясения, что видно при сравнении записей, сделанных на эт. 31 и шпиле. Согласно [Антикаев, 2012], с учетом отмеченных особенностей балльность на эт. 31 составляет ~2 балла.

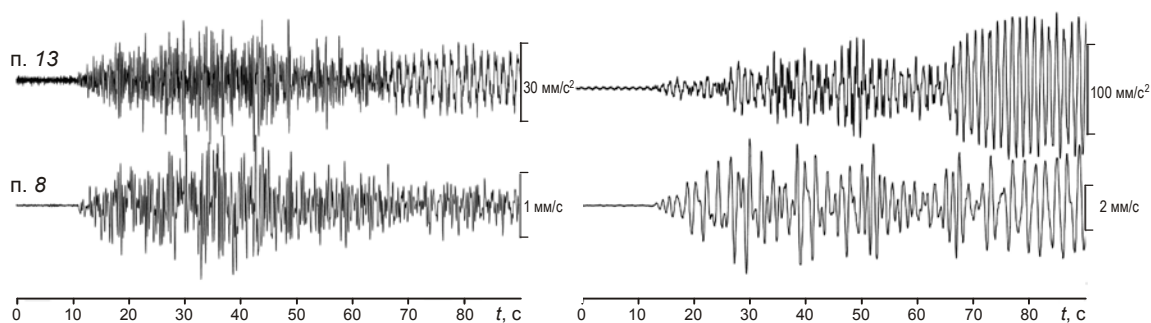


Рис. 7. Участки записей Z-компонент (слева) и X-компонент (справа) P-волн от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г., выполненных с использованием велосиметра в п. 8 (эт. 31) и акселерометра в п. 13 (шпиль)

Описанное поведение конструкции может быть объяснено путём создания расчетной модели здания на основании строительных чертежей с учетом реального сейсмического воздействия от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г. Как было показано выше, могут использоваться как сейсмограммы, записанные на первом этаже главного здания, так и на постаменте здания физического факультета. При этом, с нашей точки зрения, необходимым является включение в расчетный алгоритм модели нелинейных связей в конструкциях.

Рассмотрим изменение амплитуды колебаний сооружения в зависимости от высоты их регистрации, обратившись к рис. 8.

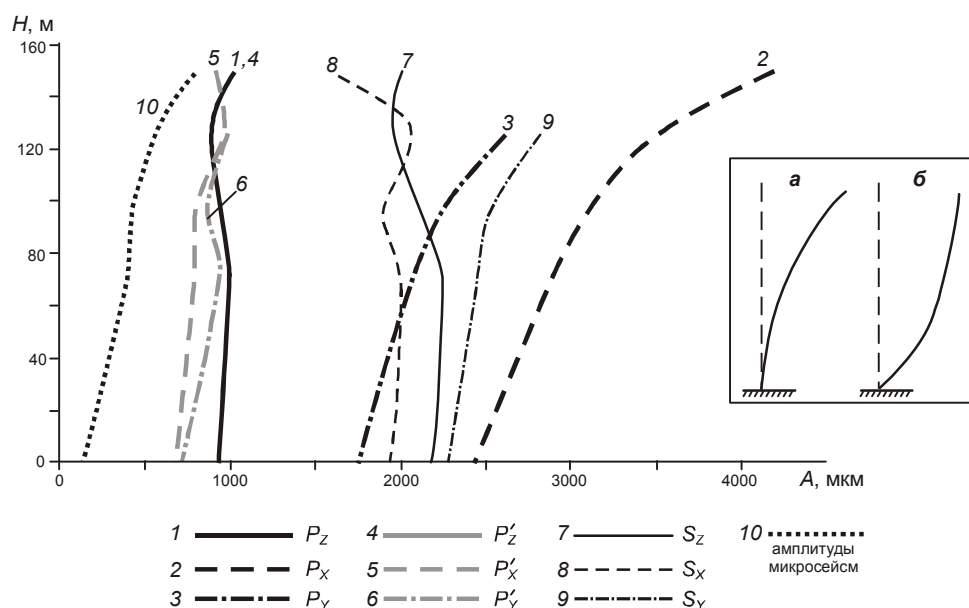


Рис. 8. Расчетные амплитуды смещений (A , мкм) вследствие воздействия объёмных волн от землетрясения в Охотском море 24.05.2013 г. в точках, расположенных на разных высотных отметках (H , м). Расчеты выполнены для Z-, X-, Y-компонент. На врезке – теоретическая схема распределения амплитуд колебаний высотного здания при работе конструкции на изгиб (а) и сдвиг (б). Пояснения см. в тексте

Приведенный набор кривых соответствует оценкам амплитуд объёмных P- и S-волн, пересчитанным в смещения для Z-, X-, Y-компонент. Измерения амплитуды P-волны проводились двумя способами: кривые со знаком P соответствуют оценке по

максимальному размаху для соответствующих фаз (кривые 1–3), P' – оценке по первому вступлению, наименее осложненному влиянием конструкции (кривые 4–6). Для S -волн оценка выполнялась только по максимальному размаху (кривые 7–9). Для сравнения на этом же рисунке приведен график изменения с высотой амплитуд микросейсм (кривая 10).

Анализ кривых наиболее интересен с точки зрения выяснения особенностей работы конструкций – на изгиб или на сдвиг (схематически соответствующие кривые приведены на врезке на рис. 8). Отметим, что направление оси X практически совпадает с азимутом на источник – разница не превышает 8° , что соответствует максимальной погрешности установки сейсмометра в наблюдательной сети. Приведенные графики свидетельствуют о следующем.

1. Вызванные землетрясением колебания основных несущих конструкций главного здания МГУ без ротонды и шпиля (т.е. до эт. 31) наибольшую амплитуду имеют в направлении по оси X , которое для P -волн практически совпадает с азимутом на эпицентр. Амплитуда колебаний не превышает 5 мм.

2. Устойчивое нарастание амплитуды колебаний с высотой наблюдается для микросейсм, продольных волн по обоим горизонтальным компонентам и поперечных волн на Y -компоненте, ориентация которой совпадает с направлением колебаний среды для фазы S -волн от данного землетрясения.

3. Наблюдается нарастание с высотой амплитуды колебаний от землетрясения до ~100 мкм (до эт. 23, отм. 95.55 м). Основные несущие конструкции до указанной высоты имеют форму параллелепипеда, и деформации конструкции интерпретируются как сдвиговые. На более высоких уровнях деформации приобретают вид изгибов.

4. Зарегистрированные амплитуды первых вступлений колебаний для продольных волн (кривые 5, 6 на рис. 8) практически не меняются с высотой, в то время как достигнутый максимум в группе P -волн (P_X, P_Y на рис. 8) уже отражает отклик конструкции здания на динамическое воздействие колебаний от землетрясения. Это еще одно доказательство возможности расположения точек сейсмологического мониторинга в теле массивных сооружений, обеспечивающего при анализе сейсмограмм расчёт как кинематических параметров землетрясения, так и динамических параметров здания.

Выводы

Результаты анализа материалов мониторинга высотного здания МГУ сетью сейсмических станций экспериментально доказывают ряд фактов, касающихся параметров собственных колебаний сооружений:

- проявление сезонных температурных вариаций в изменении значений частот собственных колебаний;
- связь длиннопериодной составляющей собственных колебаний с подземными конструкциями здания и его основанием;
- связь амплитуд собственных колебаний преимущественно с медленными макрометеорологическими ветровыми пульсациями.

Получена оценка увеличения массы навершия конструкции (шпиля) и частоты его собственных колебаний при аномальных нагрузках в виде “ледяного дождя”.

Рассмотрены методические вопросы организации мониторинга. Показано, что установка сейсмометров в теле массивного сооружения, в том числе на верхних отметках, практически не искажает кинематические характеристики волновых полей (времена вступлений сейсмических волн), по крайней мере, на записях сильных землетрясений.

По этим же записям могут быть выделены характерные особенности поведения здания, например, изменение типа деформаций со сдвиговых на изгибные, что в рассмотренном случае связано с изменением площади и формы сечения сооружения с высотой.

Выявленные особенности колебаний высотного здания на современном этапе развития методов проектирования могут, и даже должны, найти отражение в результатах расчётов отклика здания на сейсмическое воздействие по его строительной модели. Очевидно, что предложенный мониторинг и моделирование дополняют друг друга при оценке потенциально опасных воздействий и текущего состояния конструкций здания. Одним из важных вопросов является моделирование колебаний башен и шпилей высотных зданий, широко применяемых в настоящее время в архитектурных решениях.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 14-27-00015).

Литература

- Антикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: ООО “Наука и образование”, 2012. 176 с.
- Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Марченков А.Ю.* Мониторинг грунтов оснований высотных зданий методом ветровых колебаний // Инженерно-экологические изыскания в строительстве: теоретические основы, методика, методы, практика / Сергеевские чтения, вып. 8. М.: ГЕОС, 2006. С.271–274.
- Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Кузьменко А.П., Гриценко А.А., Сабуров В.А., Данилов И.А., Бах А.А.* Детальные инженерно-сейсмометрические исследования зданий и сооружений // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. С.61–72.
- Корчинский И.Л.* Колебания высотных зданий. М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1953. 44 с.
- Николаев С.В.* Высотные здания – это комплекс профессиональных решений // Жилищное строительство. 2005. № 9. С.2–10.
- Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M.* Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. 2013. V. 24. P.353–363.

Сведения об авторах

МАРЧЕНКОВ Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Земли, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2. Тел.: 8(495) 939-38-48. E-mail: martchenkov@physics.msu.ru

КАПУСТЯН Наталия Константиновна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: 8(916) 910-95-72. E-mail: nkapustian@gmail.com

СМИРНОВ Владимир Борисович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Земли, Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2. Тел.: 8(495) 939-38-48; ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: vsmirnov@physics.msu.ru

A CASE OF REGISTERING SEISMIC IMPACT ON THE HIGH-RISE BUILDING OF THE MOSCOW STATE UNIVERSITY

A.Yu. Marchenkov¹, N.K. Kapustian², V.B. Smirnov^{1,2}

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

² *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Seismological monitoring of the high-rise building of the Moscow State University (MSU) has been conducted since 2010. 13 three-component seismic stations similar to those used by the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS) are installed inside the building at various height. The frequency range of instruments is about 0.02–50 Hz, GPS synchronization is applied.

Amplitudes of vibrations caused by seismic and wind effects recorded at various heights were compared to previously obtained GS RAS results and data available for other high-rise buildings in Moscow. An eigen-oscillation frequency range was obtained for the MSU building and its spire depending on the weather. Frequency variations were given for eigen-oscillations of the spire under ice load during the freezing rain in 2010.

The article also presents analysis of MSU building vibrations, caused by the distant Okhotsk Sea earthquake (23 May 2013, $M=8.4$). The amplitude of these vibrations exceeded all previous records. The vibrations are being analyzed in the paper in order to study the response of the building to seismic effects. Some methodological deductions were made concerning the system's observation capacities and the necessity to create computational models of the building, which will allow to use experimental data for determining the current structural state of the building.

Keywords: seismic effect, monitoring of buildings, seismological observation, modeling.