

УДК 699.841+72.719

PACS 91.30.Dk

ИЗУЧЕНИЕ ВИБРАЦИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НАДВРАТНОЙ ЦЕРКВИ С КОЛОКОЛЬНОЙ ДАНИЛОВА МОНАСТЫРЯ ПРИ ЗВОНЕ КОМПЛЕКТА ИСТОРИЧЕСКИХ КОЛОКОЛОВ

А.В. Калинина¹, М.Л. Владов², В.А. Волков¹, С.М. Аммосов¹, Н.В. Волков¹

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Автор для переписки: В.А. Волков, e-mail: vav_volkov@mail.ru

Аннотация. В сентябре 2008 г. в Свято-Данилов монастырь в Москве был возвращен исторический комплект колоколов. Колокола общим весом 27 т были размещены на колокольне с использованием новой системы подвеса. В статье изложены результаты оценки параметров колебаний элементов конструкции колокольни и здания Надвратной церкви с точки зрения существующих норм безопасности. Измерения проведены в 19 пунктах с использованием трехкомпонентных широкополосных велосиметров CMG-6T GURALP. По результатам исследований сделан вывод, что вибрационное воздействие на колокольню и храм не превышает существующие нормы допустимых вибрационных воздействий на памятники архитектуры.

Ключевые слова: вибрационные воздействия на памятники архитектуры, колокола, параметры колебаний, широкополосные велосиметры, нормы безопасности

Цитирование: Калинина А.В., Владов М.Л., Волков В.А., Аммосов С.М., Волков Н.В. Изучение вибраций несущих конструкций надвратной церкви с колокольной Данилова монастыря при звоне комплекта исторических колоколов // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46, № 1. С. 49–61. DOI: 10.21455/VIS2019.1-4

ВВЕДЕНИЕ

В 1939 г. колокольню Симеона Столпника в надвратной церкви Данилова монастыря снесли почти до основания. Печальная участь ожидала и колокола, но их в буквальном смысле спас Томас Виттемор, американец, научный сотрудник Гарвардского университета, член благотворительной миссии в Москве. По его просьбе американский бизнесмен Чарльз Ричард Крейн выкупил у советского правительства весь набор колоколов Данилова монастыря. Еще летом 1930 г. все 18 колоколов были демонтированы с колокольни, а затем совершили долгое путешествие в США, в Гарвард.

Данилов монастырь был восстановлен к 1988 г. Выяснилась и судьба колоколов. Артур Хартман, выпускник Гарвардского университета, который в 1984 г. был послом США в СССР, сообщил о местонахождении колоколов и возможности их возвращения. Президент США Рональд Рейган, посетивший Данилов монастырь во время своего визита в Москву, одобрил идею возвращения колоколов в обмен на их копии.

Группа воронежских специалистов-литейщиков во время визита в США изучала параметры оригинальных колоколов для создания новых и их обмена на исторический комплект. Литье новых колоколов в Воронеже началось отливкой самого большого 14-тонного колокола-гиганта в марте 2007 г. А уже в мае того же года в Воронеже принимали основную часть комплекта новых колоколов.

Об обмене колоколами был подписан трехсторонний договор между Фондом «Связь времен», Свято-Даниловым монастырем и Гарвардским университетом. В сентябре 2008 г. Даниловские колокола вернулись в Москву (рис. 1). Следующим шагом должно было стать размещение колоколов на их постоянном месте — подвес на балке колокольни. Здесь возник ряд проблем. Дело в том, что после восстановления колокольни в 1988 году на ней были подвешен комплект колоколов, в которые и звонили в течение 20 лет. Этот комплект колоколов был примерно в три раза меньше по весу, чем первоначальный.



Рис. 1. Прибытие колоколов в Москву

Исторический комплект общим весом в 27 т должен был быть подвешен на колокольные с несущей способностью, проверенной лишь для более легкого комплекта. В результате большой работы по расчету конструкции уникального подвеса колоколов, а также ряда проб и ошибок, колокола заняли свое место. После подвеса колоколов с использованием новой системы подвеса встала задача проверки абсолютных значений параметров колебаний элементов конструкции колокольной и собственно здания Надвратной церкви вплоть до уровня земли с точки зрения существующих норм безопасности.

По просьбе наместника монастыря архимандрита Алексия сотрудниками Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в мае–июне 2011 г. был осуществлен комплекс мероприятий по измерениям вибраций в разных режимах и обработке полученной информации.

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения были проведены с использованием трехкомпонентных широкополосных велосиметров CMG-6T фирмы GURALP. Основные технические характеристики этих велосиметров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики велосиметров CMG-6T

Частотный диапазон	0.03–100 Гц
Максимальный регистрируемый сигнал	2 × 2000 В/м/с
Рабочий диапазон температур	от –40 до +75 °С
Нижняя частота паразитного резонанса	450 Гц
Уровень внутренних шумов	– 172 дБ
Линейность	> 90 дБ
Температурная чувствительность	< 0.6 В на 10 °С
Потребляемый ток при 12 В DC	38 мА
Корпус	герметичный
Диаметр корпуса	154 мм
Высота корпуса (с ручкой)	207 мм
Вес датчика	2.49 кг
Плита основания датчика	жесткий анодированный алюминий
Маятники датчика	не арретируются
Выход в рабочий режим	в течение 2–3 мин
Диапазон самоцентрировки массы	± 3° от горизонтали

Регистрация проводилась с помощью сейсмических станций UGRA с 24-разрядным АЦП.

Для оценки идентичности работы аппаратуры перед началом измерений приборы устанавливались на регистрацию в одной точке, после чего проводился анализ амплитудной и фазовой идентичности каналов по каждой из компонент.

Измерения уровня колебаний были выполнены в 19 пунктах (рис. 2–4), в том числе непосредственно на несущей металлической балке, на подвесе большого колокола и на разных уровнях несущих конструкций колокольни и Надвратной

церкви. Измерения уровня колебаний проводились непосредственно во время работы колоколов, а также в фоновом режиме при отсутствии воздействия звона. Приборы ориентировались по сторонам света. В двух точках приборы были установлены на непрерывную регистрацию.

Как упоминалось выше, было организовано 19 точек измерений: на уровне звонницы — точки 1–6 (рис. 2), на подвесе, на концах балок, в проемах стен и на полу. Точки 7 и 8 расположены на лестнице, ведущей с колокольни в храм, и у порога. Точки 9–17 расположены на уровне храма

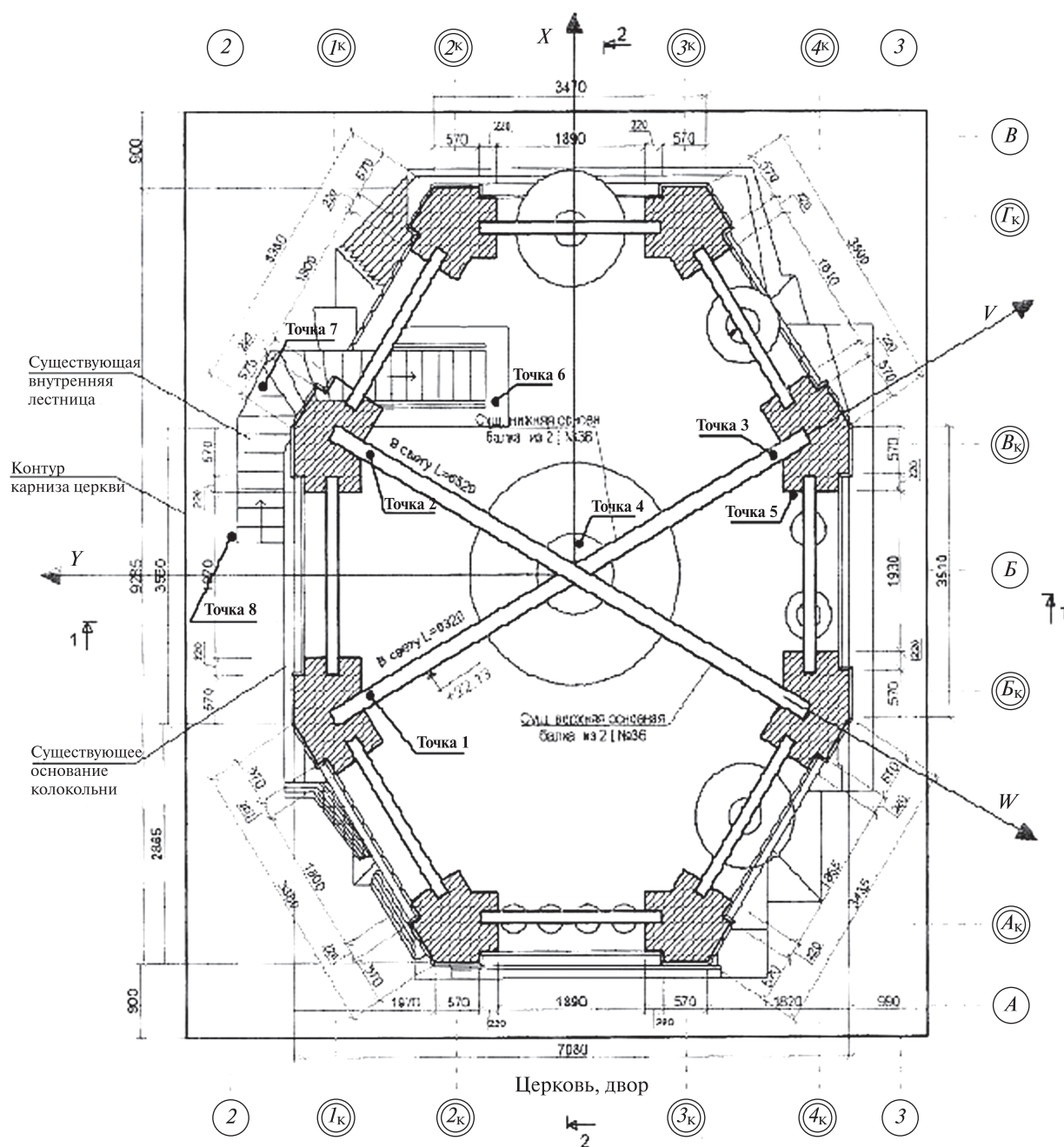


Рис. 2. Схема расположения точек измерений на уровне звонницы

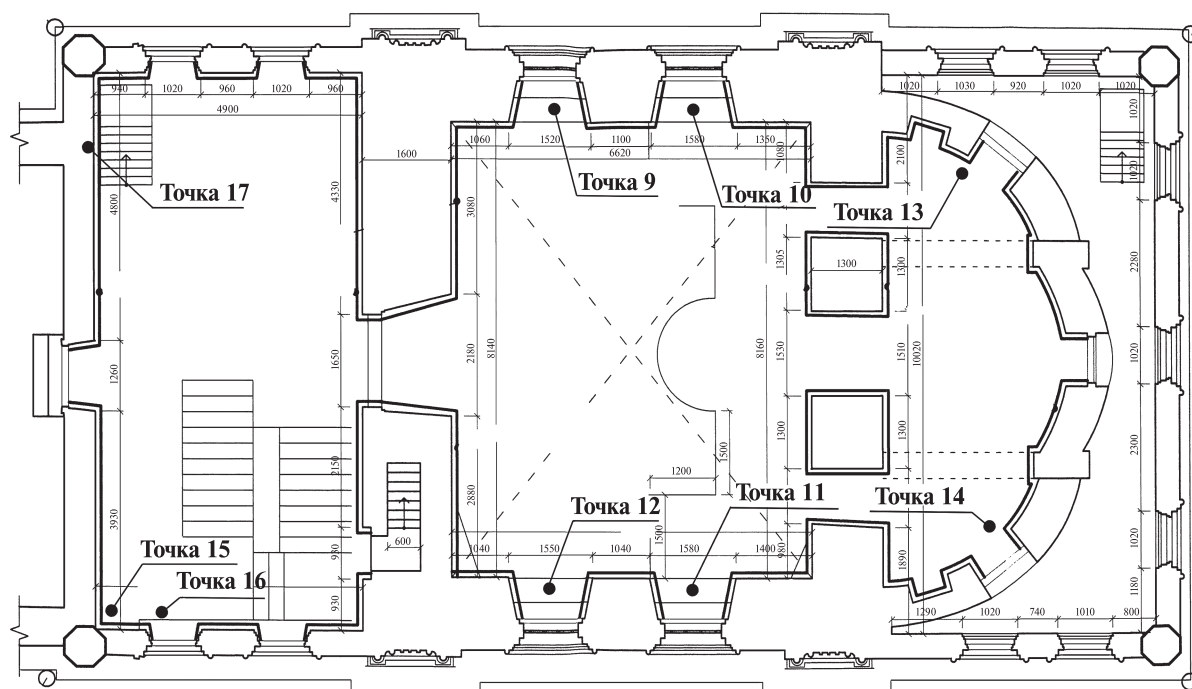


Рис. 3. Схема расположения точек измерений на уровне храма

(рис. 3), точка 18 — на подоконнике второго этажа, на этаж ниже уровня храма, и точка 19 — на поверхности земли у входа на первый этаж (рис. 4).

Пример трехкомпонентной записи представлен на рис. 5.

Всего было проведено 42 сеанса регистрации, охватывающих время вне работы колоколов и периоды звона большого колокола и всего набора колоколов.

Время регистрации в течение сеанса в среднем составляло 1.5 ч. Объем зарегистрированной информации при этом с учетом шага по времени в 0.01 секунды и трех каналов записи составил 1620000 значений. Таким образом, в течение 42 сеансов регистрации было записано около 68 млн чисел, соответствующих значениям скорости смещения точки регистрации.

ОБРАБОТКА ЗАПИСЕЙ

Задачами обработки зарегистрированных данных являлись:

- выделение участков записи колебаний в отсутствие работы колоколов;
- выделение участков записи колебаний при звоне только большого колокола;
- выделение участков записи колебаний при работе всего набора колоколов;
- анализ фоновых колебаний во времени;
- анализ фоновых колебаний по точкам регистрации;
- спектральный анализ фоновых колебаний;
- определение максимальных значений в течение длительных периодов регистрации;

- анализ колебаний во времени при звоне большого колокола;
- анализ колебаний при звоне большого колокола по точкам регистрации;
- спектральный анализ колебаний при звоне большого колокола;
- анализ колебаний во времени при работе всего набора колоколов;
- анализ колебаний при работе всего набора колоколов по точкам регистрации;
- спектральный анализ колебаний при работе всего набора колоколов.

При обработке цифровой информации использовались следующие системы и программы обработки:

- стандартный набор средств Windows 7 и Microsoft Office 2007;
- «RadExPro_2011.2» производства ООО «Деко-геофизика СК» [www.radexpro.ru].

Система «RadExPro_2011.2» позволяет в интерактивном режиме вести цифровую обработку полевой сейсмической информации и включает в себя набор процедур, позволяющих производить операции как во временной, так и в частотной областях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЗАПИСЕЙ ФОНА

При анализе результатов обработки использовался принцип максимальной оценки. В соответствии с этим принципом рассматривались значения характеристик и параметров колебаний для максимально возможных из имеющегося набора



Рис. 4. Надвратная церковь Данилова монастыря

значений и с помощью расчетов, обеспечивающих максимальную оценку. Например, для максимального значения зарегистрированной скорости смещения u' при ширине модуля спектра всей записи от f_1 до f_2 максимальная оценка для ускорения будет $u'' \approx 2\pi f_2 \cdot u'$, а для смещения — $u \approx u'/2\pi f_2$. При этом 1 мм/с^2 составляет примерно $10^{-4} g$, где g — ускорение свободного падения.

Полученные таким образом максимальные оценки параметров колебаний использовались для сравнения с нормами допустимых колебаний.

В фоновом режиме измерений на записях можно выделить участки как с меньшим, так и с большим уровнем амплитуды колебаний, что, по-видимому, связано с изменением интенсивности

движения городского транспорта в разное время суток (рис. 6).

Для дальнейших вычислений были использованы участки записи фона с максимальными значениями уровня колебаний; при этом рассматривался «размах» амплитуд, т. е. $u'^+_{\text{макс}} - u'^-_{\text{макс}}$.

На рис. 7 для примера приведены нормированные модули спектров для записей в точке 2.

В итоге для фоновой режим колебаний можно сделать следующие выводы:

1. Максимальные величины скоростей смещения приурочены к середине дня, между 15 и 16 ч.
2. Максимальные величины скоростей смещения зарегистрированы в точке 4 — собственно подвесе колоколов. В ближайших

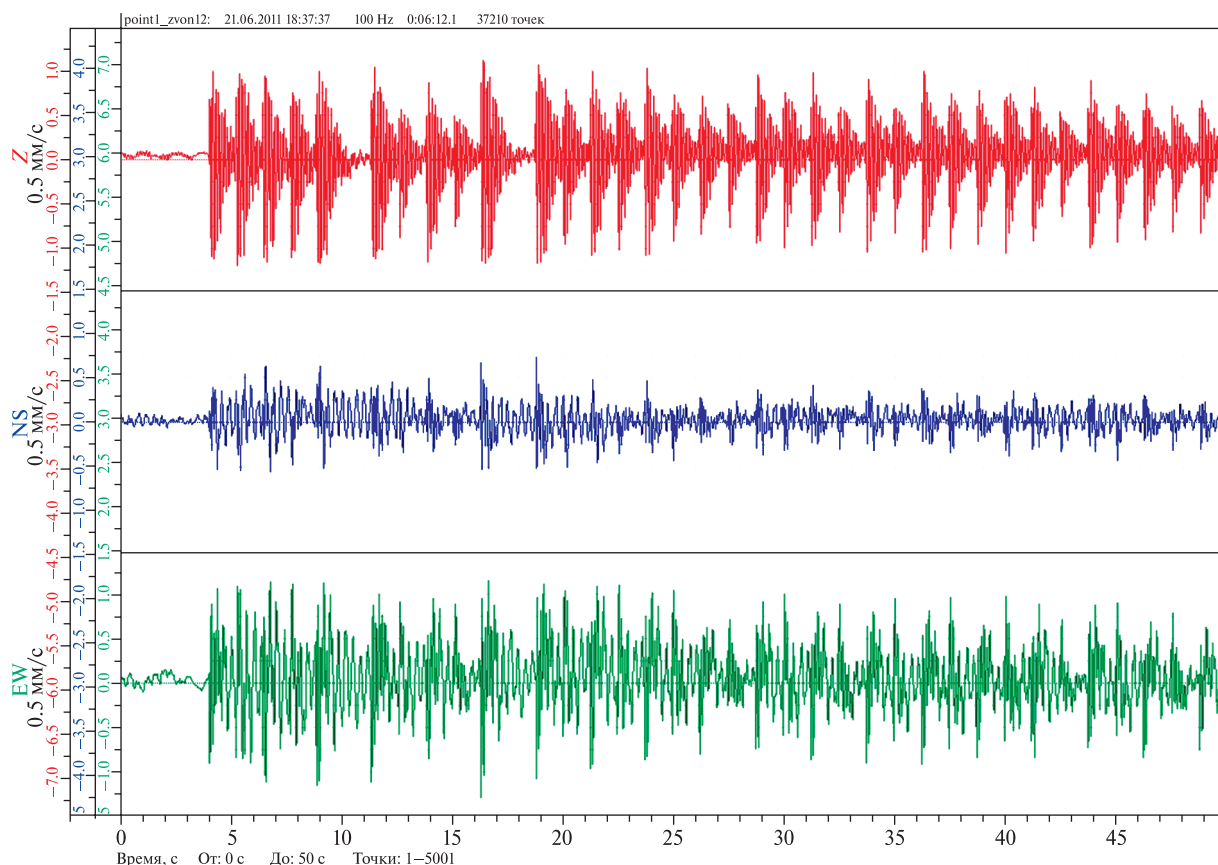


Рис. 5. Пример записи трех компонент (вертикальной Z, меридиональной NS и широтной EW) скоростей смещений конструкций церкви во время звона во все колокола, включая большой колокол, в точке 1

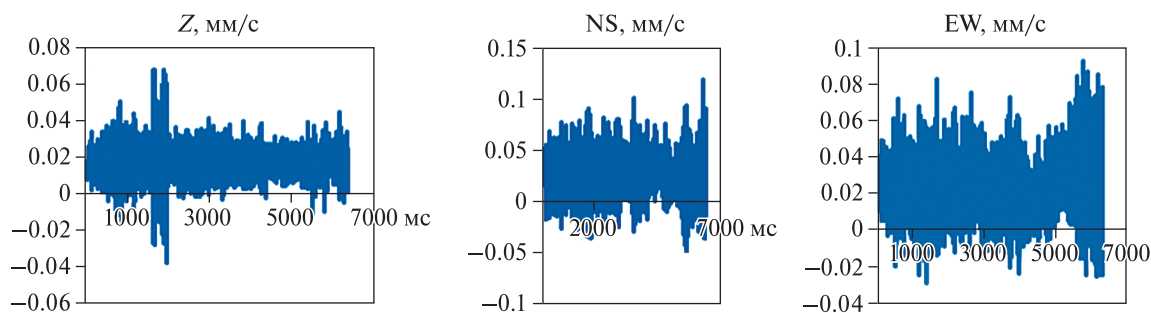


Рис. 6. Пример фоновых записей в точке 2

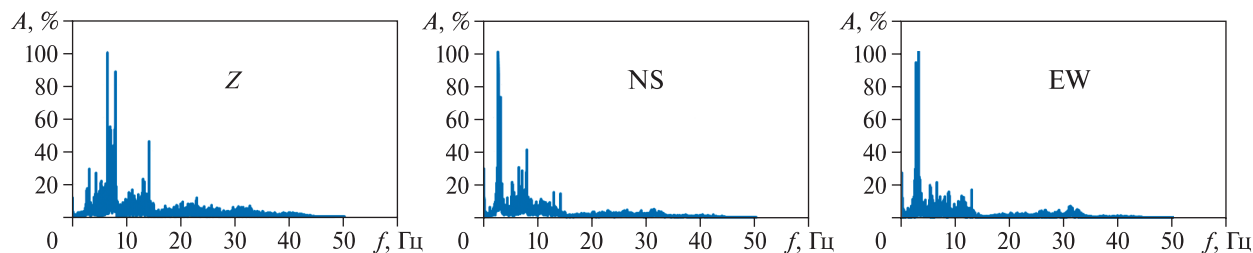


Рис. 7. Нормированные модули спектров для записей в точке 2 (компоненты Z, NS, EW слева направо, по оси абсцисс – частота, Гц)

Таблица 2. Максимальные значения характеристик фоновых колебаний

Точка	Компонента	Максимум смещения, мм, на частоте 2.5 Гц	Максимум смещения, мм, на частоте 7.5 Гц	Максимум скорости смещения, мм/с, в диапазоне частот 0–30 Гц	Максимум ускорения смещения, мм/с ² , на частоте 2.5 Гц	Максимум ускорения смещения, мм/с ² , на частоте 7.5 Гц
3 (балка)	Z	0.010	0.003	0.16	2.51	7.53
	NS	0.016	0.005	0.25	3.92	11.78
	EW	0.016	0.005	0.25	3.92	11.78
4 (подвес)	Z	0.039	0.012	0.60	9.42	28.26
	NS	0.018	0.006	0.30	4.71	14.30
	EW	0.036	0.012	0.40	6.28	18.84
5 (стена)	Z	0.006	0.002	0.10	1.57	4.71
	NS	0.008	0.003	0.12	1.88	5.65
	EW	0.010	0.003	0.16	2.51	7.53

к подвесу точек регистрации 3 и 5 скорости смещения в разы меньше. По мере приближения к поверхности земли максимальные значения скоростей смещения быстро убывают.

- Основными значениями частот, в окрестности которых концентрируется спектральная плотность, являются 2.5 Гц и 7.5 Гц. В то же время в некоторых точках спектр распределяется достаточно равномерно в полосе частот до 30 Гц, например в точках 10, 16–18.

В табл. 2 приведены значения измеренной максимальной скорости смещений и рассчитанных характеристик фоновых колебаний — смещений и ускорений смещений в трех точках регистрации.

Следующим шагом является обсуждение результатов обработки записей измерений в режиме работы всего исторического комплекта колоколов и отдельно большого колокола. Пример записей и их модулей спектров приведен на рис. 8.

Анализ записей, их спектров, подобных приведенным на рис. 8, и данных табл. 3 показывает следующее:

- работа всех колоколов в сравнении с работой только большого колокола приводит к увеличению скорости смещения $\dot{u}$ на точках регистрации не более чем в 2 раза;
- частотный состав колебаний при работе всех колоколов в сравнении с работой только большого колокола не приводит к существенным изменениям спектрального состава колебаний; в некоторых точках можно отметить более равномерное распределение энергии по оси частот или появление пульсаций на резонансной частоте 2.5 Гц (см., например, рис. 8), однако амплитуда этих пульсаций не выходит за рамки средних значений;

- максимальные значения амплитуды скорости смещения $\dot{u}$ и вычисленных величин смещения u и ускорения смещения u'' относятся к точке 4 (подвесу) и с точки зрения нагрузок на элементы здания эти значения можно не рассматривать;
- следующие по величинам параметры колебаний относятся к точкам 1–3 — концам балок у входа их в стены;
- точка 5 расположена на стене рядом с входом балки и точкой 3 на ней. Таким образом, можно рассчитать коэффициент передачи по амплитуде колебаний от балки на стену здания. Этот коэффициент составляет около 0.5, т. е. при передаче колебаний от балки к стене восьмерика колокольни амплитуда колебаний уменьшается в 2 раза, а энергия, соответственно, в 4 раза;
- величина скорости смещения по точкам регистрации при звоне колоколов уменьшается по мере продвижения вниз по зданию и в точке 19 у входа в здание на грунте не превышает фоновых значений, т.е. влияние работы колоколов вблизи основания здания не проявляется;
- максимальные скорости смещения элемента здания при звоне колоколов зарегистрированы в точке 5, расположенной на стене колокольни. Параметры колебаний в этой точке будут приняты при оценке опасности работы колоколов для здания.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ КОЛЕБАНИЙ И РАБОТЫ КОЛОКОЛОВ НА ЗДАНИЕ

Оценка степени опасности или пределов безопасного воздействия внешних источников коле-

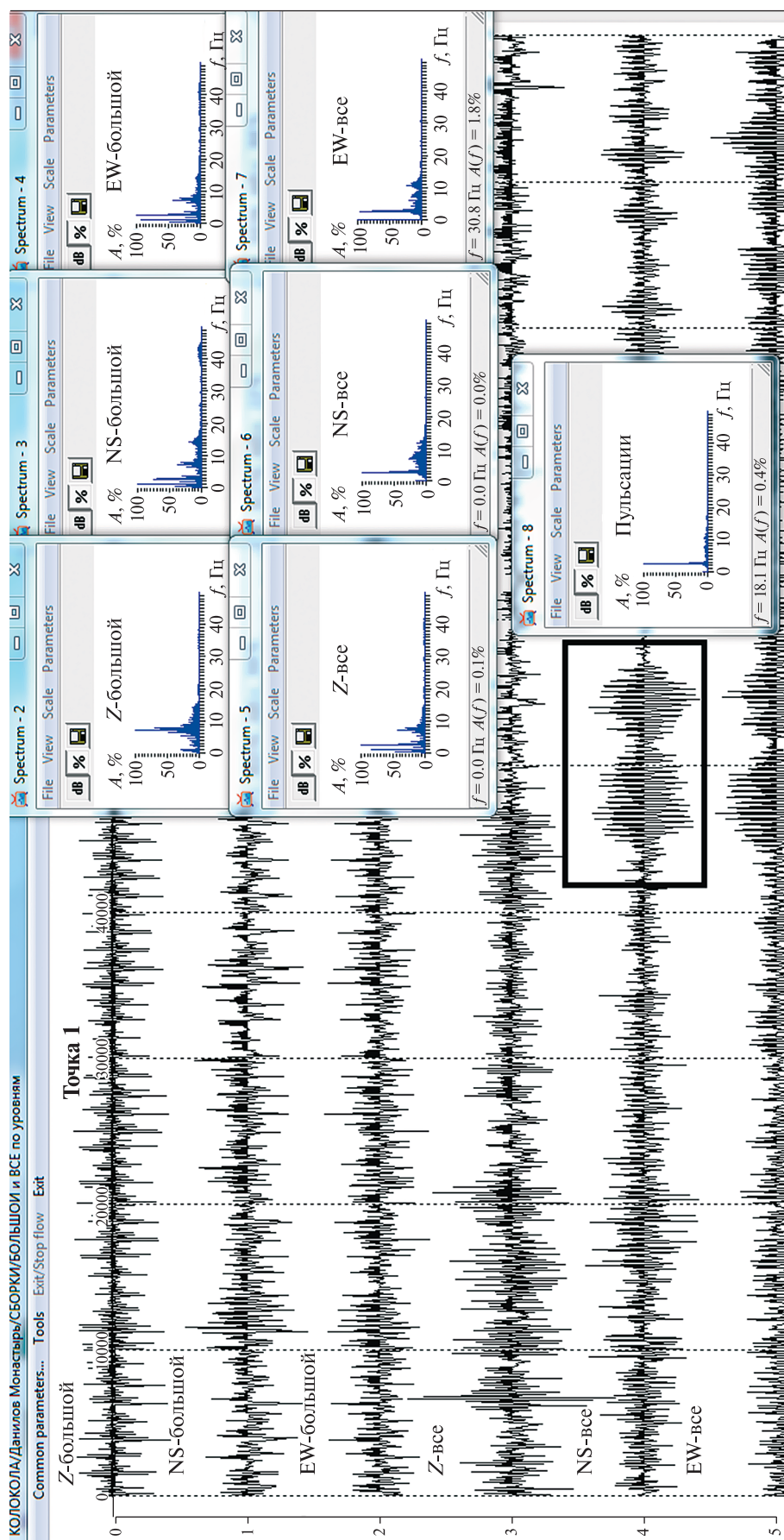


Рис. 8. Фрагменты записей скорости колебаний и их нормированные модули спектров при работе большого колокола и всех колоколов сразу в точке 1

Таблица 3. Сравнительные характеристики вибраций при звоне большого колокола и всех колоколов по точкам регистрации [большой/все]

№ точки	Компонента	Максимум смещения, мм, на частоте 1.2 Гц	Максимум смещения, мм, на частоте 2.5 Гц	Максимум смещения, мм, на частоте 7.5 Гц	Максимум скорости смещения, мм/с, в диапазоне частот 0–30 Гц	Максимум ускорения смещения, мм/с², на частоте 1.2 Гц	Максимум ускорения смещения, мм/с², на частоте 2.5 Гц	Максимум ускорения смещения, мм/с², на частоте 7.5 Гц
1 (балка)	Z	0.265 / 0.291	0.127 / 0.140	0.042 / 0.046	2.00 / 2.20	15.1 / 16.6	31.4 / 34.5	94.2 / 103.6
	NS	0.106 / 0.212	0.051 / 0.102	0.017 / 0.034	0.80 / 1.60	6.0 / 12.0	12.6 / 25.2	37.7 / 75.4
	EW	0.265 / 0.291	0.127 / 0.140	0.042 / 0.046	2.00 / 2.20	15.1 / 16.6	31.4 / 34.5	94.2 / 103.6
2 (балка)	Z	0.265 / 0.291	0.127 / 0.140	0.042 / 0.046	2.00 / 2.20	15.1 / 16.6	31.4 / 34.5	94.2 / 103.6
	NS	0.265 / 0.291	0.127 / 0.140	0.042 / 0.046	2.00 / 2.20	15.1 / 16.6	31.4 / 34.5	94.2 / 103.6
	EW	0.031 / 0.04	0.159 / 0.165	0.053 / 0.055	2.50 / 2.60	18.9 / 19.7	39.3 / 40.9	117.7 / 122.4
3 (балка)	Z	0.398 / 0.464	0.191 / 0.223	0.064 / 0.074	3.00 / 3.50	22.6 / 26.4	47.1 / 54.9	164.9 / 192.3
	NS	0.265 / 0.331	0.127 / 0.159	0.042 / 0.053	2.00 / 2.50	15.1 / 18.9	31.4 / 39.3	94.2 / 117.7
	EW	0.398 / 0.464	0.191 / 0.223	0.064 / 0.074	3.00 / 3.50	22.6 / 26.4	47.1 / 54.9	164.9 / 192.3
4 (подвес)	Z	- / 0.796	- / 0.382	- / 0.128	- / 6.00	- / 45.2	- / 94.2	- / 282.6
	NS	- / 0.530	- / 0.254	- / 0.084	- / 4.00	- / 30.2	- / 62.8	- / 188.4
	EW	- / 0.530	- / 0.254	- / 0.084	- / 4.00	- / 30.2	- / 62.8	- / 188.4
5 (восьмерик)	Z	0.110 / 0.130	0.04 / 0.06	0.012 / 0.02	0.60 / 1.00	4.5 / 7.5	9.4 / 15.6	28.1 / 46.9
	NS	0.130 / 0.200	0.06 / 0.09	0.02 / 0.03	1.00 / 1.50	7.5 / 15.6	15.6 / 46.9	46.9 / 70.3
	EW	0.130 / 0.200	0.06 / 0.09	0.02 / 0.03	1.00 / 1.50	7.5 / 15.6	15.6 / 46.9	46.9 / 70.3
6	Z	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	- / 0.40	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5
	NS	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	- / 0.20	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5
	EW	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	- / 0.15	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5
9	Z	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	0.27 / 0.40	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5
	NS	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	0.20 / 0.30	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5
	EW	≤ 0.07	≤ 0.04	≤ 0.012	0.20 / 0.34	≤ 3.75	≤ 7.53	≤ 23.5

Примечание. Значения параметров вибраций в других точках регистрации значительно меньше, чем в точке 6, и здесь не приводятся.

баний на здания и сооружения производится на основании разнообразных шкал и норм. Обилие этих документов, их изменчивость, появление новых редакций старых документов и появление новых документов говорит о трудности формализации процесса оценки. Самая разработанная область здесь — это оценка сейсмических воздействий от землетрясений. Другое хорошо разработанное направление — оценка сейсмических воздействий от взрывов [Садовский, 1946; Цейтлин и др., 1957; Edwards, Nordwood, 1960; Медведев, 1964; Сафонов, Кузнецов, 1967; Единые..., 1992].

Производится оценка воздействия промышленных взрывов в карьерах, оказавшихся с течением времени в пределах или вблизи городской застройки, а также оценка влияния на здания и сооружения строительных технологий, связанных

с однократным или многократным воздействием, например забивка свай, создание свай с помощью электровзрывных технологий и т. п. Процесс оценки воздействия более или менее упрощается в случае типовых сооружений и типизированных грунтовых условий, поскольку речь идет об образовании сейсмической волны во внешнем по отношению к зданию источнике, распространении волны по грунту и воздействии на здание со стороны его основания. В случае же оценки влияния работы колоколов на собственно сооружение — колокольную, храм и нижние этажи здания — источник вибрации расположен в самом сооружении, причем сверху, на самой подвижной его части.

Допустимые уровни воздействия на здания со стороны внешних источников колебаний приведены в табл. 4.

Таблица 4. Допустимые уровни воздействий по данным различных источников

Степень сейсмического воздействия	Максимальная амплитуда скорости сейсмических колебаний, см/с			
	Преобладающая частота $f \leq 30$ Гц	Преобладающая частота 45 Гц	Преобладающая частота 60 Гц	Преобладающая частота ≥ 75 Гц
Допустимые величины [Барон, Кантор, 1989]	5	5.7	7.5	9.4
Максимально допустимая величина для каркасных зданий [Единые правила..., 1992]	7.1–8.4	8–9.5	10.7–12.6	13.3–15.8
Появление трещин в стенах [Садовский, 1946]	12–14	13.6–15.8	18–21	22.6–26.3
Допускается для зданий, имеющих удовлетворительное состояние [Медведев, 1964]	3–6	3.4–6.8	4.5–9	5.6–11.3
Допускается для зданий, имеющих деформации [Медведев, 1964; Афонин и др., 1974]	1.5–3	1.7–3.4	2.3–4.5	2.8–5.6
Допускается при удаленных взрывах [Цейтлин и др., 1957]	2–3	2.3–3.4	3–4.5	3.8–5.6
Появление первых трещин в каменных зданиях [ГОСТ 6249-52] ¹	11.4	12.9	17.1	21.4
Нет заметных трещин [Тислен, Синд, 1962]	7	7.9	10.5	13.2
Нет заметных повреждений зданий на коренных и скальных породах [Батуев, 1995]	13–25	14.7–28.3	19.5–37.5	24.4–47
Осыпание побелки, трещины не возникают [Батуев, 1995]	3	3.4	4.5	5.6
Максимально допустимая величина для жилых зданий любой конструкции [Батуев, 1995]	5.1	5.8	7.7	9.6

Степень сейсмического воздействия	Максимальная амплитуда скорости сейсмических колебаний, см/с			
	Преобладающая частота $f \leq 30$ Гц	Преобладающая частота 45 Гц	Преобладающая частота 60 Гц	Преобладающая частота ≥ 75 Гц
Сильные повреждения кирпичных зданий в плохих грунтовых условиях [Батуев, 1995]	10	11.3	15	18.8
Примечание. Вышеприведенные данные относятся к малоэтажным зданиям и сооружениям.				
Предельно допустимые значения для зданий и памятников, находящихся под охраной государства² [Богацкий, Пергамент, 1978; Автоматизированный расчет..., 1993]	0.2–0.5	0.23–0.6	0.3–0.8	0.38–0.94
Осыпание побелки, повреждение штукатурки и отдельных ветхих зданий ¹	1.5–3	1.7–3.4	2.3–4.5	2.8–5.6
Предельно допустимые значения для зданий с чувствительными измерительными инструментами ³	1.5	1.7	2.3	2.8
Предельно допустимые значения для жилых зданий ³	2.5	2.8	3.8	4.7
Предельно допустимые значения для нежилых зданий ³	5	5.7	7.5	9.4
Трещины в штукатурке, опадание побелки ⁴	1–3	1.1–3.4	1.5–4.5	1.9–5.6
Допустимые значения для каркасных (железобетонных и деревянных) зданий ²	1–3	1.1–3.4	1.5–4.5	1.9–5.6
Допускается для гидротехнических тоннелей, откосов, стволов шахт, квершлагов, штолен, уклонов, магистральных нефте-, газо-, водопроводов, рудоводов, складов ВВ [Богацкий, 1983]	20	23	30	38
Допустимое значение для ветхих зданий [Афонин и др., 1974]	0.8–1	0.9–1.1	1.2–1.5	1.5–1.9
Допустимо для жилых зданий [Афонин и др., 1974]	1	1.1	1.5	1.9
Допускается для промышленных сооружений [Афонин и др., 1974]	3	3.4	4.5	5.6
Нарушений нет [Сафонов, Кузнецов, 1967]	1–1.5	1.1–1.7	1.5–2.3	1.9–2.8
Трещины в штукатурке, осыпание побелки [Сафонов, Кузнецов, 1967]	1.5–6	1.7–6.8	2.3–9	2.8–11.3

Таким образом, сравнивались минимальные для всей таблицы значения, предельно допустимые для зданий и памятников, находящихся под охраной государства¹ [Богацкий, Пергамент,

¹Инструкции Технической палаты ГДР 046/72, 046/86.

¹ ГОСТ 6249-52 Шкала для определения силы землетрясения в пределах от 6 до 9 баллов.

² Инструкции Технической палаты ГДР 046/72, 046/86.

³ Нормы "AA-explosiv code-1975". Австрия, 1975.

⁴ Нормы SN640312. Швейцария, 1974.

1978; Автоматизированный расчет..., 1993], с зарегистрированными максимальными значениями характеристик вибраций в частотном диапазоне ≤ 30 Гц соответственно. Максимальная амплитуда скорости сейсмических колебаний, зарегистрированная в точке 5 при работе всех колоколов сразу, составляет 0.1 см/с на вертикальной компоненте и 0.15 см/с на горизонтальных компонентах. При этом смещения не превышают 0.2 мм при допустимых значениях 0.2–0.5 мм, а ускорения не превышают 7 см/с² ($7 \cdot 10^{-3} g$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований сделан вывод о том, что благодаря специально разработанным подвесам вибрационное воздействие на колокольню и храм от работы полного набора исторических колоколов не превышает существующие нормы допустимых вибрационных воздействий на памятники архитектуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении измерений и обсуждении результатов иеродиакону Роману (Огрызкову).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

Автоматизированный расчет безопасных условий сейсмике взрывов (Учебное пособие) / Ред. Пергамент В.Х., Атлас А.Б., Мельников И.Т., Сураев В.С. Магнитогорск: МГМИ, 1993. 64 с.

Афонин В.Г., Гейман Л.Н., Комир В.М. Справочное руководство по взрывным работам в строительстве. Киев: Будивельник, 1974. 382 с.

Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США. М.: Недра, 1989. 376 с.

Батуев М.А. Опыт Качканарского ГОКа по созданию новых систем инициирования для карьеров // Горный журнал. 1995. № 8. С. 23–24.

Богацкий В.Ф., Пергамент В.Х. Сейсмическая безопасность при взрывных работах. М.: Недра, 1978. 128 с.

Богацкий В.Ф. Прогноз и ограничение сейсмической опасности промышленных взрывов // Взрывное дело 85/42. Сейсмика промышленных взрывов. М.: Недра, 1983. С. 201–213.

Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: НПО ОБТ, 1992. 238 с.

Медведев С.В. Сейсмика горных взрывов. М.: Недра, 1964. 188 с.

Садовский М.А. Простейшие приемы определения сейсмической безопасности. М.: ИГД ММ СССР, 1946. 28 с.

Сафонов Л.В., Кузнецов Г.В. Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов. М.: Наука, 1967. 102 с.

Тислен Э., Синд П. Замеры колебаний при взрыве // Разрушение и механика горных пород. М.: Госгортехиздат, 1962. С. 158–178.

Цейтлин Я.И., Крючков В.В., Тихоновский В.И. Исследование сейсмического эффекта взрывов на руднике Тырныаузского комбината // Горный журнал. 1957. № 9. С. 32–37.

Edwards A.T., Nordwood T.D. Experimental studies of the effects of blasting on structures // The Engineers. 1960. V. 210. P. 538–546.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛИНИНА Анна Викторовна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-24-30. E-mail: kalinina_av@mail.ru

ВЛАДОВ Михаил Львович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1. Тел.: +7 495 939-33-42. E-mail: vladov_ml@mail.ru

ВОЛКОВ Виктор Александрович – старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр.1. Тел.: +7 499 254-24-30. E-mail: vav_volkov@mail.ru

АММОСОВ Сергей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-24-30. E-mail: ammosovser@mail.ru

ВОЛКОВ Николай Викторович – старший инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр.1. Тел.: +7 499 254-24-30. E-mail: vav_volkov@mail.ru

STUDY OF THE VIBRATIONS OF THE BEARING STRUCTURES OF THE GATE CHURCH WITH THE BELL TOWER OF THE DANILOV MONASTERY DURING THE RINGING OF THE COMPLEX OF HISTORIC BELLS

A.V. KALININA¹, M.L. VLADOV², V.A. VOLKOV¹, S.M. AMMOISOV¹, N.V. VOLKOV¹

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Moscow State University, Moscow, Russia

Corresponding author: V.A. Volkov, e-mail: vav_volkov@mail.ru

Abstract. In September 2008, the historic set of bells was returned to the St. Daniel Monastery in Moscow. Bells with a total weight of 27 tons were placed on the bell tower using a new suspension system. The article presents the results of the evaluation of the vibration parameters of the elements of the structure of the bell tower and the Gate Church building in terms of existing safety standards. Measurements were carried out at 19 points using three-component broadband CMG-6T GURALP velocimeters. According to the research, it was concluded that the vibration impact on the bell tower and the temple does not exceed the existing norms of permissible vibration effects on architectural monuments.

Keywords: vibration effects on architectural monuments, bells, vibration parameters, broadband velocimeters, safety standards

ABOUT THE AUTHORS:

KALININA ANNA VIKTOROVNA - Ph.D. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya, 10, building 1. Tel.: +7 (499) 254-24-30. E-mail: kalinina_av@mail.ru

VLADOV MIKHAIL LVOVICH - Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Seismometry and Geoacoustics, Geological Faculty, Moscow State University. Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie Gory, 1. Tel.: +7 495 939-33-42. E-mail: vladov_ml@mail.ru

VOLKOV VICTOR ALEKSANDROVICH - Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya, 10, building 1. Tel.: +7 499 254-24-30. E-mail: vav_volkov@mail.ru

AMMOISOV SERGEY MIKHAILOVICH - Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya, 10, building 1. Tel.: +7 (499) 254-24-30. E-mail: ammosovser@mail.ru

VOLKOV NIKOLAY VIKTOROVICH - Senior Engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. 123242, Moscow, ul. Bolshaya Gruzinskaya, 10, building 1. Tel.: +7 499 254-24-30. E-mail: vav_volkov@mail.ru

Cite this article as: Kalinina A.V., Vladov M.L., Volkov V.A., Ammosov S.M., Volkov N.V. Study of the vibrations of the bearing structures of the gate church with the bell tower of the Danilov Monastery during the ringing of the complex of historic bells, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2019. V. 46, No. 1. P. 49–61. [in Russian]. DOI: 10.21455/VIS2019.1-4

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>, 2020, Volume 56, Issue 1.