ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ. СПЕЦИАЛЬНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 004.4:624.044

А.М. Шахраманьян, Ю.А. Колотовичев
ООО «СОДИС Лаб»

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОЛИМПИЙСКИХ ОБЪЕКТАХ СОЧИ-2014

Приведены результаты работы автоматизированной системы мониторинга деформационного состояния несущих конструкций ледовой арены «Шайба» Олимпийского парка г. Сочи во время землетрясения, произошедшего 23 декабря 2012 г. Оборудование арены системой динамического мониторинга позволило оценить влияние сейсмического события на строительные конструкции, сделать оперативные выводы об отсутствии повреждений несущих конструкций, получить ценные данные о динамическом отклике сооружения.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, вибродиагностика, мониторинг, система мониторинга, мониторинг строительных конструкций, динамика сооружений, динамический мониторинг, землетрясения, Сочи, Олимпийские объекты, ледовая арена

Причинами аварий строительных конструкций часто становятся дефекты, образующиеся в результате действия различных факторов окружающей среды, многие из которых рассмотрены на реальных примерах в [1—4].

Проведение мониторинга определенных параметров несущих конструкций в процессе их возведения и с начала периода эксплуатации позволяет отследить возникновение негативных процессов, которые могут угрожать механической безопасности здания.

В период строительства Олимпийских объектов Сочи-2014 и в соответствии с действующими в тот период нормативными документами [5] все основные Олимпийские объекты берегового кластера (ледовый дворец «Большой», керлинговый центр «Ледяной куб», крытый конькобежный центр «Адлер-арена», дворец зимнего спорта «Айсберг», ледовая арена «Шайба», олимпийский стадион «Фишт») были оборудованы автоматизированными системами мониторинга технического (напряженно-деформированного) состояния несущих конструкций, которые учитывали расположение объектов в сейсмически опасном районе.

Первым объектом в Олимпийском парке, на котором была запущена автоматизированная система мониторинга, стало здание ледовой арены «Шайба» (строительное наименование «Малая ледовая арена»). Рассматриваемая в настоящей статье система мониторинга не отличается богатым разнообразием измерительных систем и характеризуется весьма небольшим для сооружений подобного класса набором оборудования. Тем не менее еще в активный период проведения пуско-наладочных работ с помощью системы были получены весьма любопытные данные, которые подтвердили перспективность внедрения автоматизированной системы мониторинга деформационного состояния несущих конструкций (АСМК) на сооружениях с большепролетными покрытиями.

АСМК ледовой арены «Шайба» (рис. 1) была введена в эксплуатацию в ноябре 2012 г. Система осуществляет мониторинг динамических характеристик ферм покрытия и угловых деформаций фундаментной плиты [6].

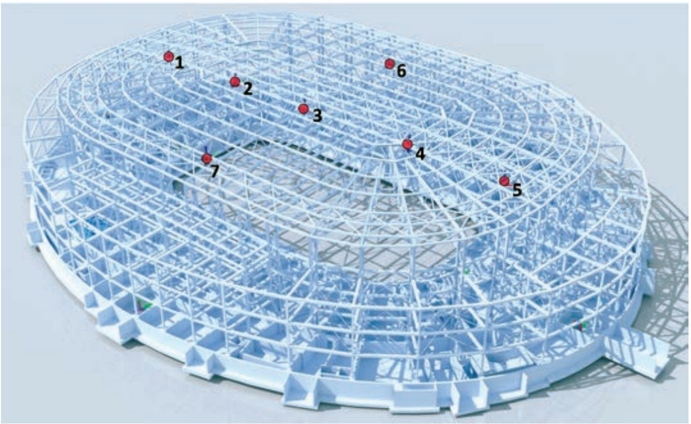
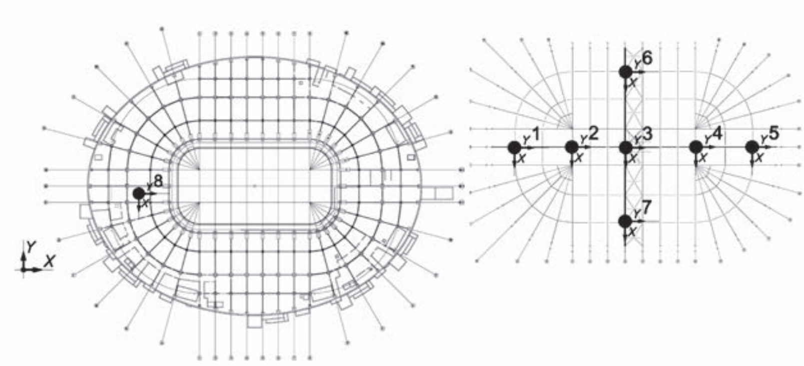


Рис. 1. Компьютерная модель несущего каркаса и схема расстановки акселерометров на покрытии ледовой арены «Шайба»

В состав измерительных систем (рис. 2) АСМК входят восемь высокочувствительных двухкомпонентных цифровых наклономеров типа ИН-Д3 производства ЗАО «НТП "Горизонт"», установленных на фундаментных конструкциях, и восемь цифровых трехкомпонентных сейсмических акселерографов GMS-18-63 — датчиков ускорения производства GeoSIG Ltd., семь из которых установлены на нижнем поясе ферм покрытия, а последний — на фундаментной плите для регистрации входящего сейсмического воздействия (рис. 3).

Рис. 2. Оборудование системы мониторинга в проектном положении на ледовой арене «Шайба»



а *б*

Рис. 3. Расположение акселерометров на фундаменте (отм. –3.620) (*а*) и конструкциях покрытия (отм. +17.280) (*б*) ледовой арены «Шайба»

Система работает под управлением специализированного программного обеспечения SODIS Building M3 (рис. 4), которое в режиме реального времени осуществляет сбор и обработку мониторинговых данных, выводит на экран диспетчера информацию о состоянии объекта мониторинга и оборудования АСМК.

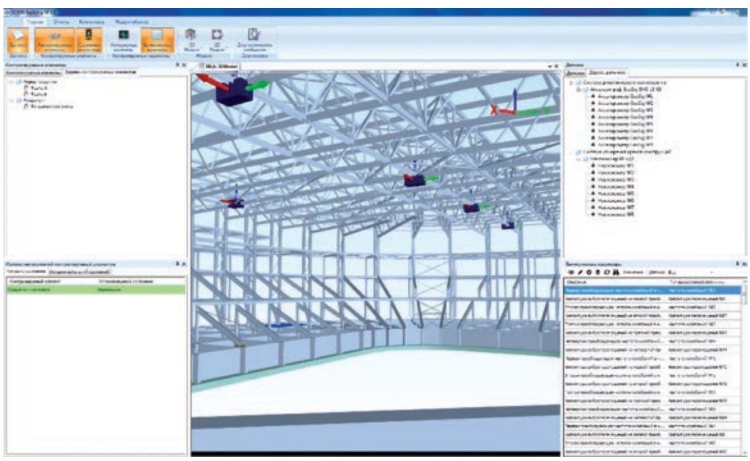


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса SODIS Building M3 2012 г. с выведенными на экран данными мониторинга ледовой арены «Шайба»

В декабре 2012 г. на территории Краснодарского края и в акватории Черного моря произошли землетрясения с магнитудами от 4,9 до 5,8 (табл. 1), которые ощущались многими людьми на территории Олимпийского парка (III—IV балла по шкале Меркалли) и были успешно зарегистрированы автоматизированной системой мониторинга ледовой арены (рис. 5, 6).

Табл. 1. Характеристики зарегистрированных землетрясений (по данным Геофизической службы РАН [7])

Номер	Дата	Время	Магнитуда	Координаты эпицентра
1	10.12.2012	16:56:53	4,9	N45.08 E37.52
2	23.12.2012	13:31:38	5,8	N42.51 E40.97
3	25.12.2012	22:44:32	5,4	N42.56 E40.89

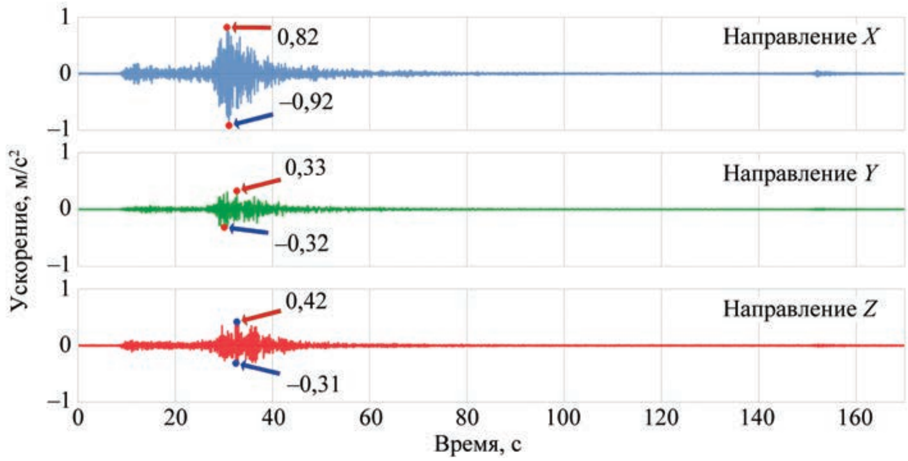


Рис. 5. Акселерограмма землетрясения 23.12.2012, полученная на нижнем поясе ферм покрытия (измерительный пункт № 5).

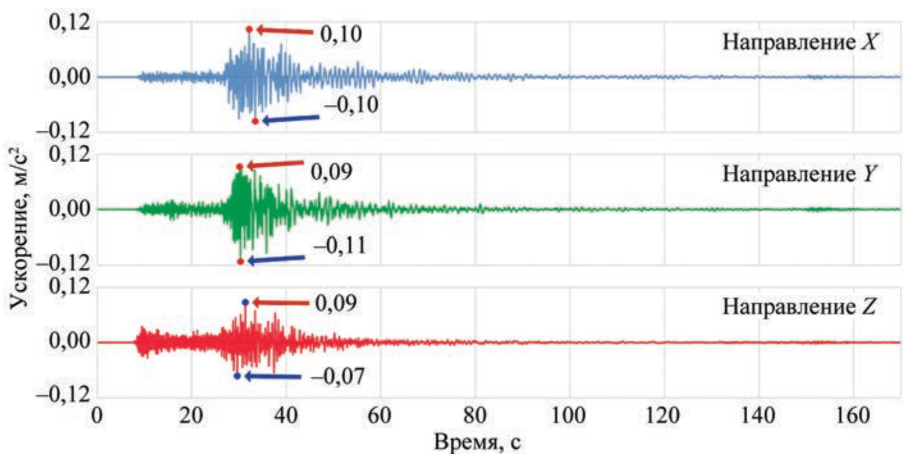


Рис. 6. Акселерограмма землетрясения 23.12.2012, полученная на фундаментной плите (измерительный пункт № 8)

В статье приведены результаты анализа второго наиболее сильного сейсмического события от 23.12.2012. Качественная картина динамического отклика сооружения по двум другим толчкам не отличается от рассмотренной.

Полученные результаты позволят построить расчетную динамическую модель для проведения исследований по оценке сейсмостойкости здания [8].

Во время землетрясения отмечалось резонансное увеличение амплитуд колебаний покрытия арены более чем в 8 раз (табл. 2) по сравнению с колебаниями фундамента в том же направлении. Максимальные колебания каркаса зарегистрированы в направлении оси *X* датчиков — вдоль малой оси здания.

В качестве одного из основных методов интегральной оценки степени воздействия на сооружение, которое было оказано чрезвычайной ситуацией или ее последствиями, используется мониторинг изменений модальных параметров — собственных частот и амплитуд колебаний наиболее ответственных элементов конструкций на собственных частотах. Для вычисления модальных параметров используется техника операционного модального анализа [9—12].

Табл. 2. Амплитудные значения виброускорений, зарегистрированные на конструкциях во время землетрясения 23.12.2012, м/с^2

Конструкции	Номер датчика	*X*	*Y*	*Z*
Фермы покрытия	1	0,83	0,32	0,32
	2	0,33	0,35	0,63
	3	0,35	0,36	0,34
	4	0,33	0,34	0,68
	5	0,92	0,32	0,42
	6	0,31	0,78	0,41
	7	0,32	0,61	0,32
Фундамент	8	0,11	0,09	0,09

Метод основывается на том известном из динамики сооружений факте, что изменение модальных параметров вызывается изменением массово-жесткостных характеристик конструкции: развитием дефектов или перераспределением нагрузки [13, 14]. Предпосылки к применению метода в виде определения основного тона колебаний в «паспорте здания» закреплены в положениях ГОСТ 31937—2011 (актуализированный ГОСТ 53778—2010). Результаты численных экспериментов авторов настоящей статьи, а также результаты, полученные в [15, 16], показали, что мониторинг основного тона колебаний для большинства объектов гражданского строительства не решает основной задачи мониторинга — своевременного выявления негативных изменений напряженно-деформированного состояния, особенно если мониторинг проводить с периодичностью, предписываемой указанным нормативным документом. В частности, в [17] применительно к высотным зданиям показано, что мониторинг исключительно одной собственной частоты колебаний недостаточен для контроля напряженно-деформированного состояния объекта — небольшое изменение напряженно-деформированного состояния на верхних этажах может внести большие изменения в значения собственных частот колебания, в то время как большие изменения на нижних этажах могут почти не сказаться на значениях частот. Даже очень значительные локальные повреждения конструкций часто не ведут к заметному изменению основного тона колебаний, гораздо более чувствительными к дефектам являются высокие частоты спектра — обертона.

С помощью программного модуля в составе комплекса SODIS Building M, разработанного специалистами СОДИС Лаб, производится непрерывный мониторинг спектрального состава операционных колебаний объекта в широком диапазоне частот (для рассматриваемого здания — от 0,5 до 50 Гц).

Оборудование здания ледовой арены автоматизированной системой динамического мониторинга в декабре 2012 г. позволило оценить влияние сейсмических колебаний на строительные конструкции здания. Акселерограммы, пропущенные через программный модуль, показали (рис. 7, 8), что контролируемые динамические параметры конструкций изменяли свои значения за пределы допустимых интервалов только во время непосредственной сейсмической активности, а после — стабилизировались на прежнем уровне (изменения частот менее 0,7 %, что меньше точности измерений).

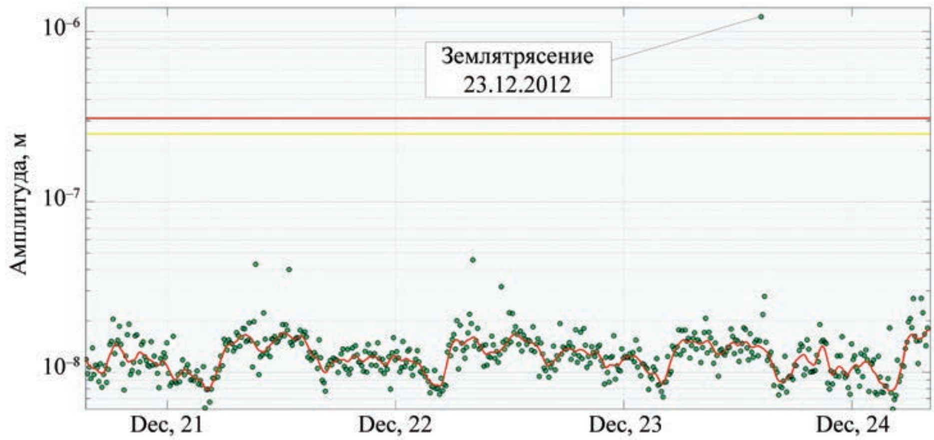


Рис. 7. Выброс амплитуды виброперемещений в направлении *X* на частоте собственных колебаний здания 2,68 Гц во время землетрясения 23.12.2012. Точка № 5

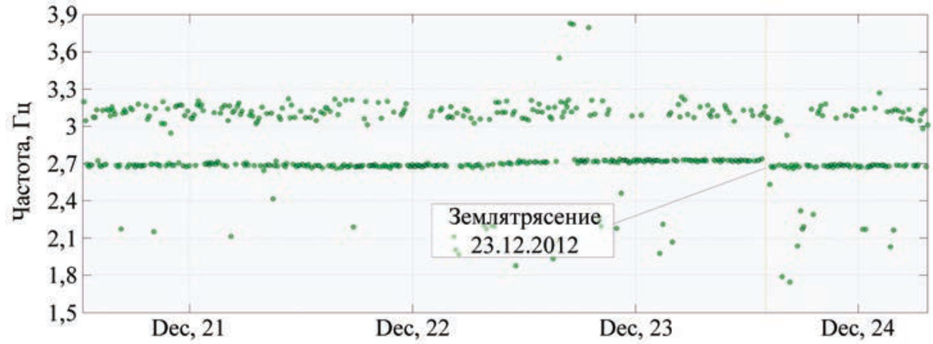


Рис. 8. Регистрируемая в окрестностях 2,68 Гц частота собственных колебаний здания во время землетрясения 23.12.2012. Точка № 5

Эта информация была получена системой автоматически и выступила в поддержку принятия решения об отказе от масштабного технического обследования здания, что позволило не допустить срыва графика ввода объекта в эксплуатацию.

Более подробный анализ поступившей информации был проведен для подтверждения правильности интерпретации данных мониторинга программным обеспечением и совершенствования алгоритма принятия решений. Анализ сонограмм (виброграмм) виброперемещений покрытия арены, полученных в высоком разрешении и покрывающих период сейсмической активности с 17 по 27 декабря 2012 г., показал (рис. 9, 10), что спектральный состав колебательного процесса до и после сейсмических событий не претерпел заметных изменений. Этот факт дает, по нашему мнению, достаточно оснований полагать, что землетрясения не вызвали повреждений конструктивных элементов покрытия и здания в целом.

На рис 10 можно легко увидеть спектральный состав динамического отклика покрытия арены «Шайба» на сейсмические события 23 и 25 декабря 2012 г. в диапазоне от 0,5 до 10 Гц.

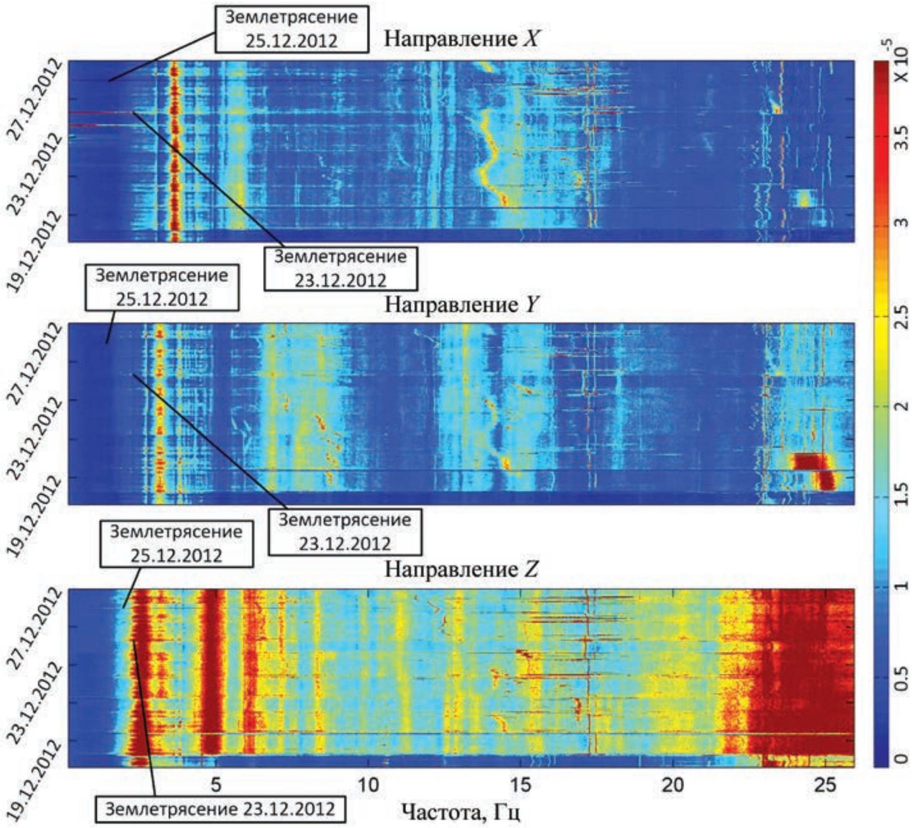


Рис. 9. Сонограмма виброперемещений, м, покрытия ледовой арены «Шайба» в точке № 3 в конце декабря 2012 г.

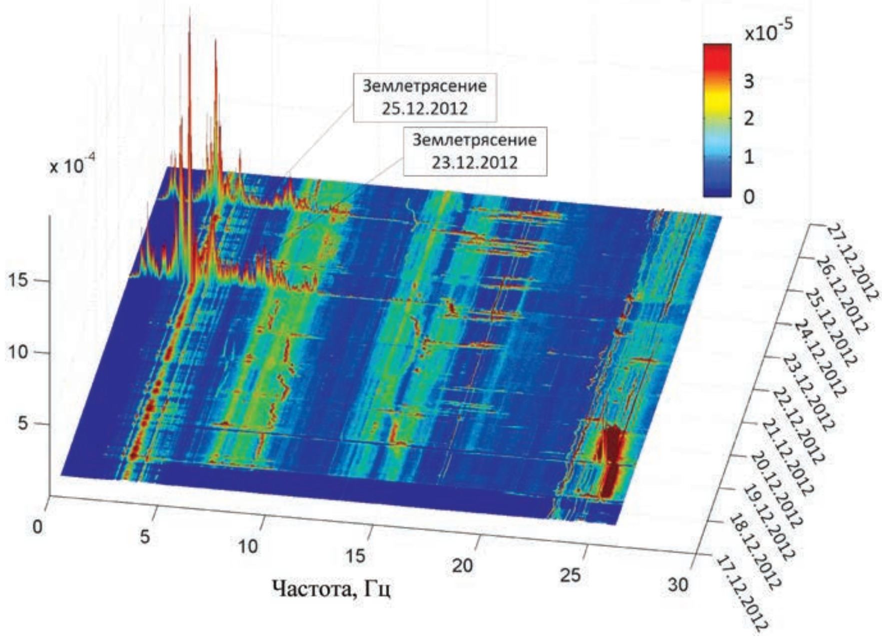


Рис. 10. Сонограмма виброперемещений, м, покрытия ледовой арены «Шайба» в точке № 3 в направлении *Y* в конце декабря 2012 г.

Как показал опыт эксплуатации АСМК сооружений Олимпийского парка и ряда других объектов, в частности систем мониторинга многоэтажных монолитных зданий, наблюдение за модальными параметрами в операционном режиме при очень слабых воздействиях представляет собой нетривиальную проблему, особенно когда речь заходит об автоматизации процесса извлечения частот собственных колебаний.

Микросейсмический колебательный процесс крайне непостоянен (рис. 9, 11, 12), на него влияет огромное количество переменных во времени внешних факторов, таких как ветровое воздействие, инженерное оборудование, перемещение людей и механизмов, температура [18], солнечная радиация и т.д. Это приводит к заметным изменениям на спектре и, следовательно, к ошибкам определения модальных параметров в случае непродолжительного наблюдения. В спектре меняется множество параметров: соотношение амплитуд пиков, ширина пиков (изменения в характере демпфирования), даже положение пиков может заметно «плавать», могут появляться новые частоты и пропадать наблюдаемые ранее. Отдельную сложность представляет идентификация близко расположенных частот, особенно в случае колебаний с существенно различными коэффициентами модального демпфирования.

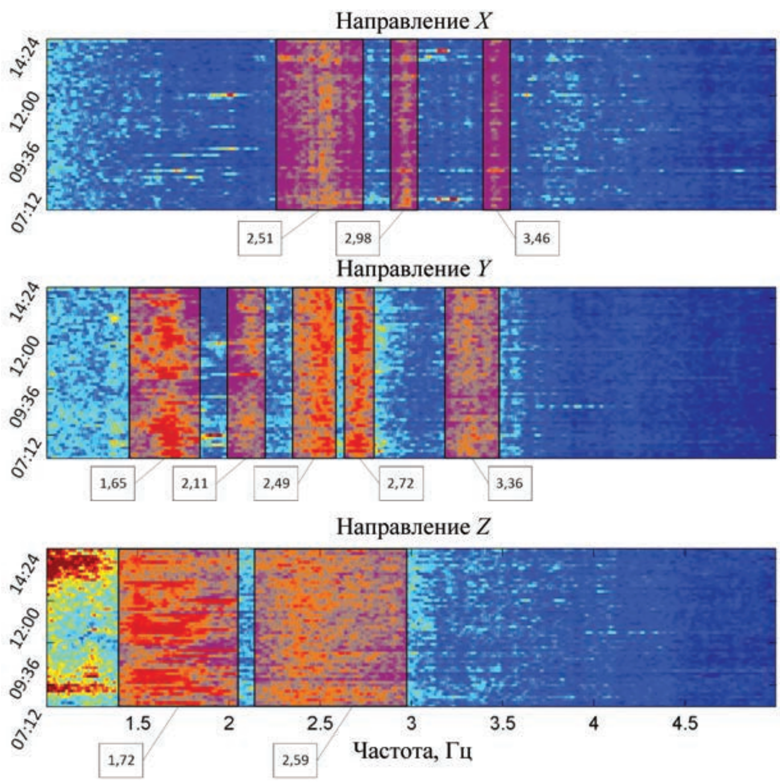


Рис. 11. Сонограмма виброперемещений покрытия конькобежного центра «Адлер-арена», полученная 22.05.2012 г.

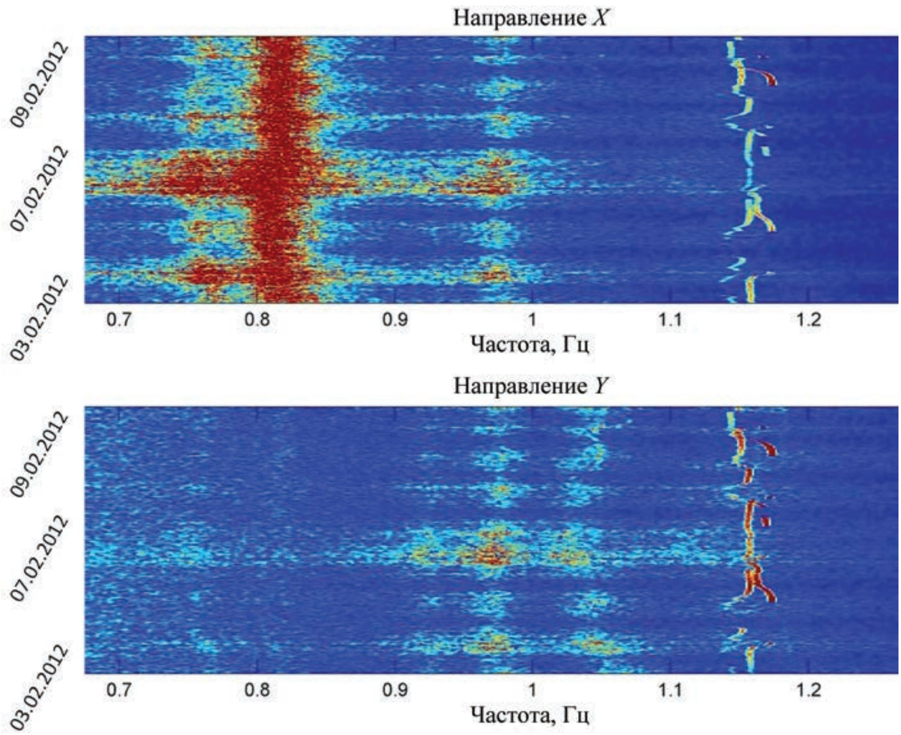


Рис. 12. Сонограмма виброперемещений верхнего технического этажа ЖК «Скай форт», секция 6, корпус 206, г. Москва

Объяснение механизмов спектральных изменений выходит далеко за рамки настоящей статьи, но сам факт их наличия привел нас к убеждению, что качественный динамический мониторинг модальных параметров, результаты которого помогают решать задачу идентификации повреждений в строительных конструкциях, возможен только с устройством на объекте стационарной станции мониторинга. Режим мониторинга при этом должен быть постоянным и продолжительным по времени — в режиме постоянного мониторинга спектра колебаний удается с высокой точностью определить декременты затухания для большого числа частот [19, 20], что позволяет увеличить точность решения широкого класса задач расчета сооружений на динамические воздействия [21].

Определение динамических параметров зданий и сооружений при краткосрочных динамических испытаниях является гораздо менее точным, а в ряде случаев может приводить к ошибкам, особенно при идентификации высоких обертонов (см. рис. 12). Данные долгосрочного мониторинга позволяют даже без применения сложного математического аппарата определять частоты собственных колебаний с точностью до 0,01 Гц.

Полученные системой мониторинга записи колебаний конструктивных элементов здания на фундаментной плите и на покрытии дополнительно позволяют проверить адекватность расчетной модели объекта путем сравнения реакции здания на сейсмическое событие и реакции расчетной модели на аналогичное входное воздействие. Подобное сравнение результатов натурных динамических испытаний с данными математического моделирования проводилось применительно к высотным зданиям [22] с использованием микросейсмического входного воздействия.

Опыт проведения постоянного динамического мониторинга показал, что традиционные подходы к программно-аппаратной структуре АСМК плохо подходят для сбора, хранения и обработки большого массива данных, который поступает с датчиков ускорения. Это привело к ряду концептуальных изменений в архитектуре систем мониторинга, разрабатываемых СОДИС Лаб — частичному отказу от применения реляционных баз данных, распараллеливанию и кластеризации процедур сбора и обработки данных на аппаратном уровне, гомогенизации способа хранения всех без исключения данных мониторинга, вне зависимости от их объема и скорости поступления, что кардинальным образом увеличило быстродействие и надежность системы мониторинга в целом.

Пример ледовой арены «Шайба» показывает, что установка автоматизированной системы мониторинга уникальных зданий и сооружений в сейсмически опасных районах позволяет решать не только задачу мониторинга и контроля технического состояния несущих конструкций в повседневном режиме, но и при сейсмической активности дополнительно проводить экспресс-оценку степени воздействия на сооружение, которое было оказано этим чрезвычайным событием или его последствиями.

При использовании данных стационарных автоматизированных систем мониторинга строительных конструкций улучшается качество решения широкого ряда практических и научно-исследовательских задач проектирования, возведения и эксплуатации зданий и сооружений [23—25], а развитие методов проведения динамического мониторинга и анализа его результатов представляется весьма перспективным направлением современной строительной науки с огромным количеством проблем, требующих для своего решения интеллектуальных усилий высококвалифицированных специалистов.

Библиографический список

1. *Сендеров Б.В.* Аварии жилых зданий. М. : Стройиздат, 1992. 216 с.

2. *Ерёмин К.И., Махутов Н.А., Павлова Г.А., Шишкина Н.А.* Реестр аварий зданий и сооружений 2001—2010 годов. М., 2011. 320 с.

3. *Сендеров Б.В., Барков Ю.В., Захаров В.А.* Анализ повреждений крупнопанельных зданий : сб. науч. тр. М., 1986. 230 с.

4. *Сендеров Б.В., Дронов Ю.П.* Натурные исследования прочности крупнопанельных зданий. Бухарест : ИНЧЕРК, 1986.

5. *Шахраманьян А.М.* Методические основы создания систем мониторинга несущих конструкций уникальных объектов // Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. № 1. С. 256—261.

6. *Shakhramanyan A., Kukartz J., Kolotovichev Y.A.* Modern structural monitoring systems for high-rise and unique buildings // 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Nottingham, UK. 2013.

7. Служба срочных донесений // Геофизическая служба РАН. Режим доступа: http://www.ceme.gsras.ru/ceme/. Дата обращения: 15.10.2015.

8. *Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А.* Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения) : 2-е изд. М. : МГСУ, 2014. С. 88—89.

9. *Batel M.* Operational modal analysis — another way of doing modal testing // Sound and Vibration. August 2002. Pp. 22—27.

10. *Siebel T., Friedman A., Koch M., Mayer D.* Assesement of mode shape-based damage detection methods under real operational conditions // 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. Dresden, Germany. 2012.

11. *Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R., Czamecki J.J.* A review of structural health monitoring literature:1996—2001. Los Alamos, NM, USA : Los-Alamos National Laboratory, Report LA-13976-MS, 2004.

12. *Rainieri C., Fabbrocino G.* Operational modal analysis of civil engineering structures. 1st ed. New York : Springer-Verlag, 2014. 322 p.

13. *Патрикеев А.В.* Система динамического мониторинга инженерного сооружения как ключевой элемент его технической безопасности // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 133—140.

14. *Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э., Зубков Д.А., Румянцев А.А.* Динамический мониторинг зданий и сооружений для контроля их сейсмостойкости // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. Сентябрь 2009. Режим доступа: http://pamag.ru/src/pressa/126.pdf.

15. *Белостоцкий А.М., Каличава Д.К., Нагибович А.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О.* Адаптируемые конечноэлементные модели в основе динамического мониторинга несущих конструкций высотных зданий. Часть 2. Верификация методики на стендовых моделях // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Т. 8. № 4. С. 28—42.

16. *Савин С.Н., Демишин С.В., Ситников И.В.* Мониторинг уникальных объектов с использованием динамических параметров по ГОСТ Р 53778-2010 // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 7. С. 33—39.

17. *Шахраманьян А.М.* Анализ возможности мониторинга состояния высотных зданий на основе контроля собственных частот колебаний // Русский инженер. 2013. № 1 (36). С. 34—35.

18. *Корепанов В.В., Цветков Р.В.* Сезонные изменения собственных частот колебаний зданий на свайном фундаменте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 2. С. 153—167.

19. *Minh-Nghi T., Lardies J., Marc B.* Natural frequencies and modal damping ratios identification of civil structures from ambient vibration data // Shock and Vibration. 2006. No. 13. Pp. 429—444.

20. *Cruciat R., Ghindea C.* Experimental determination of dynamic characteristics of structures // Mathematical Modelling in Civil Engineering. 2012. No. 4. Pp. 51—59.

21. *Дмитриев С.Н., Хамидуллин Р.К.* Коррекция матрицы демпфирования с использованием экспериментальных значений коэффициентов модального демпфирования // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 3 (15). Режим доступа: http://engjournal.ru/articles/619/619.pdf.

22. *Шахраманьян А.М.* Системы мониторинга и прогноза технического состояния зданий и сооружений. Теория и практика // Русский инженер. 2011. № 1 (28). С. 54—64.

23. *Капустян Н.К., Климов А.Н., Антоновская Г.Н.* Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // Высотное строительство. 2013. № 11. С. 6—12.

24. *Капустян Н.К., Таракановский В.К., Вознюк А.Б., Климов А.Н.* Действующая система мониторинга высотного жилого здания в Москве // Предотвращение аварий зданий и сооружений : сб. науч. тр. Август 2010. Режим доступа: http://pamag.ru/src/pressa/028.pdf.

25. *Климов А.Н.* Прогноз развития напряженно-деформированного состояния конструкций высотного здания на основании данных системы мониторинга // Жилищное строительство. 2013. № 11. С. 13—16.

Поступила в редакцию в ноябре 2015 г.

Об авторах: **Шахраманьян Андрей Михайлович** — кандидат технических наук, генеральный директор, **ООО «СОДИС Лаб»**, 143026, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Луговая, д. 4, корп. 2, andranic@sodislab.com;

Колотовичев Юрий Александрович — кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, **ООО «СОДИС Лаб»**, 143026, г. Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Луговая, д. 4, корп. 2, ykol@sodislab.com.

Для цитирования: *Шахраманьян А.М., Колотовичев Ю.А.* Опыт использования автоматизированных систем мониторинга деформационного состояния несущих конструкций на Олимпийских объектах Сочи-2014 // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 92—105.

A.M. Shakhraman'yan, Yu.A. Kolotovichev

EXPERIENCE OF USING AUTOMATED MONITORING SYSTEMS OF THE STRAIN STATE OF BEARING STRUCTURES ON THE OLYMPIC OBJECTS SOCHI-2014

Various defects, which occur because of the influence of different environmental factors become the reason for the emergencies of building structures. Monitoring of certain parameters of bearing structures in the process of their erection and beginning of operation will help detecting negative processes which may endanger mechanical safety of buildings.

The authors offer the operating results of automated monitoring system of the bearing structures state of the ice arena "Shayba" in the Olympic park in Sochi during the earthquake which happened on December 23th, 2012. The arena was equipped with a dynamic monitoring system, which helped estimating the influence of a seismic occurrence on the building constructions, to make prompt conclusions on absence of damages of the bearing structures, get important data on the dynamic response of the structure.

Key words: seismic monitoring, vibrodiagnostics, monitoring, monitoring system, monitoring of building structures, structural dynamics, dynamic monitoring, earthquakes, Sochi, Olympic objects, ice arena

References

1. Senderov B.V. *Avarii zhilykh zdaniy* [Emergencies of Residential Buildings]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1992, 216 p. (In Russian)

2. Eremin K.I., Makhutov N.A., Pavlova G.A., Shishkina N.A. *Reestr avariy zdaniy i sooruzheniy 2001—2010 godov* [Register of the Emergencies of Buildings and Structures in 2001—2010]. Moscow, 2011, 320 p. (In Russian)

3. Senderov B.V., Barkov Yu.V., Zakharov V.A. Analiz povrezhdeniy krupnopanel'nykh zdaniy [Analysis of Damages of Large Panel Buildings]. *Sbornik nauchnykh trudov* [Collection of Scientific Works]. Moscow, 1986, 230 p. (In Russian)

4. Senderov B.V., Dronov Yu.P. *Naturnye issledovaniya prochnosti krupnopanel'nykh zdaniy* [Field Surveys of the Stability of Large Panel Buildings]. Bukharest, Rumania, INCHERK Publ., 1986. (In Russian)

5. Shakhraman'yan A.M. Metodicheskie osnovy sozdaniya system monitoringa nesushchikh construktsiy unikal'nykh ob"ektov [Methodological Principles of the Development of Monitoring Systems of Load-bearing Structures in Unique Buildings]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 1, pp. 256—262. (In Russian)

6. Shakhramanyan A., Kukartz J., Kolotovichev Y.A. Modern Structural Monitoring Systems for High-Rise and Unique Buildings. 2nd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM). Nottingham, UK, 2013.

7. Sluzhba srochnykh doneseniy [Emergency Message Service]. *Geofizicheskaya sluzhba RAN* [Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences]. Available at: http://www.ceme.gsras.ru/ceme/. Date of access: 15.10.2015. (In Russian)

8. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A. *Problemy ucheta nelineynostey v teorii seysmostoykosti (gipotezy i zabluzhdeniya)* [Problems of Accounting for Nonlinearities in the Theory of Seismic Resistance (Hypotheses and Mistakes)]. 2nd edition. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 88—89. (In Russian)

9. Batel M. Operational Modal Analysis — Another Way of Doing Modal Testing. Sound and Vibration. August 2002, pp. 22—27.

10. Siebel T., Friedman A., Koch M., Mayer D. Assessment of Mode Shape-Based Damage Detection Methods under Real Operational Conditions. 6th European Workshop on Structural Health Monitoring. Dresden, Germany, 2012.

11. Sohn H., Farrar C.R., Hemez F.M., Shunk D.D., Stinemates D.W., Nadler B.R., Czamecki J.J. A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996—2001. Los Alamos, NM, USA, Los-Alamos National Laboratory, Report LA-13976-MS, 2004.

12. Rainieri C., Fabbrocino G. Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures. 1st edition. New York, Springer-Verlag Publ., 2014, 322 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-0767-0.

13. Patrikeev A.V. Sistema dinamicheskogo monitoringa inzhenernogo sooruzheniya kak klyuchevoy element ego tekhnicheskoy bezopasnosti [Dynamic Monitoring of Engineering Structures as a Key Element of its Technical Security]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 133—140. (In Russian)

14. Zavalishin S.I., Shablinskiy G.E., Zubkov D.A., Rumyantsev A.A. Dinamicheskiy monitoring zdaniy i sooruzheniy dlya kontrolya ikh seysmostoykosti [Dynamic Monitoring of Buildings and Structures to Control their Seismic Resistance]. *Predotvrashchenie avariy zdaniy i sooruzheniy* [Preventing Emergencies of Buildings and Structures]. September 2009. Available at: http://pamag.ru/src/pressa/126.pdf. (In Russian)

15. Belostotskiy A.M., Kalichava D.K., Nagibovich A.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. Adaptiruemye konechnoelementnye modeli v osnove dinamicheskogo monitoringa nesushchikh konstruktsiy vysotnykh zdaniy. Chast' 2. Verifikatsiya metodiki na stendovykh modelyakh [Adaptable Finite Element Models on the Basis of Dynamic Monitoring of Bearing Structures of High-rise Buildings]. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012, vol. 8, no. 4, pp. 28—42. (In Russian)

16. Savin S.N., Demishin S.V., Sitnikov I.V. Monitoring unikal'nykh ob"ektov s ispol'zovaniem dinamicheskikh parametrov po GOST R 53778-2010 [Monitoring of Unique Objects Using Dynamoc Parametres According to State Standard GOST R 53778-2010]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and Construction Journal]. 2011, no. 7, pp. 33—39. (In Russian)

17. Shakhraman'yan A.M. *Analiz vozmozhnostey monitoring sostoyaniya vysotnykh zdaniy na osnove kontrolya sobstvennykh chastot kolebaniy* [Analysis of Monitoring Possibility of High-rise Buildings' State on the Basis of Natural Frequencies Control]. *Russkiy inzhener* [Russian Engineer]. 2013, no. 1 (36), pp. 34—35. (In Russian)

18. Korepanov V.V., Tsvetkov R.V. Sezonnye izmeneniya sobstvennykh chastot kolebaniy zdaniy na svaynom fundamente [Seasonal Changes of Natural Vibrations of Buildings on Pile Foundation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2014, no. 2, pp. 153—167. (In Russian)

19. Minh-Nghi T., Lardies J., Marc B. Natural Frequencies and Modal Damping Ratios Identification of Civil Structures from Ambient Vibration Data. Shock and Vibration. 2006, no. 13, pp. 429—444. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2006/625927

20. Cruciat R., Ghindea C. Experimental Determination of Dynamic Characteristics of Structures. Mathematical Modelling in Civil Engineering. 2012, no. 4, pp. 51—59.

21. Dmitriev S.N., Khamidullin R.K. Korrektsiya matritsy dempfirovaniya s ispol'zovaniem eksperimental'nykh znacheniy koeffitsientov modal'nogo dempfirovaniya [Correction of Damping Matrix Using Experimental Values of Modal Damping Coefficients]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovations]. 2013, no. 3 (15). Available at: http://engjournal.ru/articles/619/619.pdf. (In Russian)

22. Shakhraman'yan A.M. Systemy monitoringa i prognoza tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy. Teoriya i praktika [Monitoring and Forecast Systems of Technical State of Buildings and Constructions. Theory and Practice]. *Russkiy inzhener* [Russian Engineer]. 2011, no. 1 (28), pp. 54—64. (In Russian)

23. Kapustyan N.K., Klimov A.N., Antonovskaya G.N. Vysotnye zdaniya: opyt monitoringa i puti ego ispol'zovaniya pri proektirovanii [High-rise Buildings: Monitoring Experience and Ways of its Use in Design]. *Vysotnoe stroitel'stvo* [High-rise Construction]. 2013, no. 11, pp. 6—12. (In Russian)

24. Kapustyan N.K., Tarakanovskiy V.K., Voznyuk A.B., Klimov A.N. Deystvuyushchaya sistema monitoringa vysotnogo zhilogo zdaniya v Moskve [Effective Monitoring System of a High-Rise Residential Building in Moscow]. *Predotvrashchenie avariy zdaniy i sooruzheniy* [Preventing Emergencies of Buildings and Structures]. August 2010. Available at: http://pamag.ru/src/pressa/028.pdf. (In Russian)

25. Klimov A.N. Prognoz razvitiya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya konstruktsiy vysotnogo zdaniya na osnovanii dannykh sistemy monitoringa [Development Forecast of Stress-Strain State of Structures of a High-Rise Building on the Basis of Monitoring Systems]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Constructuin]. 2013, no. 11, pp. 13—16. (In Russian)

About the authors: **Shakhraman'yan Andrey Mikhaylovich** — Candidate of Technical Sciences, Director General, **Research and Production Association of Modern Diagnostic Systems (NPO SODIS)**, innovative center «Skolkovo», 4-2 Lugovaya str., 143026, Moscow, Russian Federation; andranic@sodislab.com;

Kolotovichev Yuriy Aleksandrovich — Candidate of Technical Sciences, Deputy chief designer, **Research and Production Association of Modern Diagnostic Systems (NPO SODIS)**, innovative center «Skolkovo», 4-2 Lugovaya str., 143026, Moscow, Russian Federation; ykol@sodislab.com.

For citation: Shakhraman'yan A.M., Kolotovichev Yu.A. Opyt ispol'zovaniya avtomatizirovannykh sistem monitoringa deformatsionnogo sostoyaniya nesushchikh konstruktsiy na Olimpiyskikh ob"ektakh Sochi-2014 [Experience of Using Automated Monitoring Systems of the Strain State of Bearing Structures on the Olympic Objects Sochi-2014]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 12, pp. 92—105. (In Russian)