

УДК 550.34

DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

Оригинальная статья

Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории

Н.К. Капустян¹, В.Б. Заалишвили^{2,3,4}, Д.А. Мельков², Р.Т. Акбиев^{3,4},
Т.И. Мерзликин², Т.В. Морозова^{3,5}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: nkapustian@gmail.com;

² Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Центральный научно-исследовательский и проектный институт Минстроя России, Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29;

⁴ Евразийская СЕЙСМО Ассоциация, Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, e-mail: akbi.rust@gmail.com;

⁵ АНО «СРОСЭКСПЕРТИЗА», Россия, 119331, г. Москва, пр. Вернадского, 29, e-mail: t.morozova22@yandex.ru

Статья поступила: 03.11.2025, доработана: 02.12.2025, принята к публикации: 07.12.2025

Резюме: Получение достоверной информации о сейсмостойкости существующей застройки в настоящее время является наиболее **актуальной** задачей. Это, в первую очередь, касается застройки, сформированной из многоквартирных зданий 1960–1980-х гг. постройки. **Целью** работы является выявление наиболее важных особенностей поведения зданий и сооружений при природно-техногенных воздействиях, не учитываемых Нормами, что исключает учет изменения параметров при задании «критических значений» на стадии проектирования. **Методы.** Экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Это обусловило использование результатов мониторинга движений объектов, обусловленных природными и техногенными воздействиями. **Результаты.** Дается обзор развития инженерных сейсмометрических сетей, рассматриваются особенности установки станций, исходя не только из особенностей строительных конструкций, но и особенностей грунтовых условий. Необходимость паспортизации застройки, при которой важнейшими задачами являются оценка реальной сейсмостойкости существующих конструкций и степени износа, должна быть основана на современных технологиях мониторинга с централизованным сбором данных для совершенствования нормативной базы и экономически эффективного инструментального обследования большого количества зданий.

Ключевые слова: воздействия, инструментальный мониторинг, инженерно-сейсмометрическая сеть, застройка, сейсмостойкость, физический износ.

Для цитирования: Капустян Н.К., Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Акбиев Р.Т., Мерзликин Т.И., Морозова Т.В. Инженерно-сейсмометрические сети, как геофизический метод контроля воздействий опасных природно-техногенных процессов на урбанизированные территории. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

Original paper

Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas

N.K. Kapustyan¹, V.B. Zaalishvili^{2,3,4}, D.A. Melkov², R.T. Akbiev^{3,4},
T.I. Merzlikin², T.V. Morozova^{3,5}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences,
10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation,
e-mail: nkapustian@gmail.com;

² Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation,
e-mail: vzaal@mail.ru;

³ Central Research Institute of Construction, Ministry of Construction, Housing and Utilities
of the Russian Federation, 29 Vernadsky Ave., Moscow 119331,
Russian Federation;

⁴ Eurasian Seismic Association, 29 Vernadsky Ave., Moscow 119331,
Russian Federation, e-mail: akbi.rust@gmail.com;

⁵ SROSEXPERTIZA 29, Vernadsky Ave., Moscow 119331, Russian Federation,
e-mail: t.morozova22@yandex.ru

Received: 03.11.2025, revised: 02.12.2025, accepted: 07.12.2025

Abstract: Obtaining reliable information on the seismic resistance of existing buildings is currently urgent issue. This primarily applies to buildings consisting of multi-apartment buildings constructed between the 1960s and 1980s. **The aim** of this study is to identify the most important features of the behavior of residential buildings and structures under natural and anthropogenic impacts that are not taken into account by the by current Building Codes, which precludes consideration of parameter changes when setting “critical values” at the design stage. **Methods.** Experimental research allows for the most reliable determination of the safe potential of a building, structure, or any physical system under seismic, dynamic, and other loads. This necessitated the use of the results of monitoring object movements caused by natural and anthropogenic impacts. **Results.** An overview of the development of engineering seismometric networks is provided, and the specifics of station installation are considered, based not only on the characteristics of building structures but also on the specifics of soil conditions. The need for building certification, where the most important tasks are assessing the actual seismic resistance of existing structures and the degree of deterioration, should be based on modern monitoring technologies with centralized data collection. This is essential for improving the regulatory framework and cost-effectively instrumental surveys of large numbers of buildings

Keywords: impacts, instrumental monitoring, engineering seismometric network, building, seismic resistance, physical deterioration.

For citation: Kapustyan N.K., Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Akbiev R.T., Merzlikin T.I., Morozova T.V. Engineering seismometric networks as a geophysical method for monitoring the impact of hazardous natural and technogenic processes on urbanized areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 60–77. DOI: 10.46698/a1779-6138-3406-a

Введение

Землетрясения являются одним из наиболее опасных природных явлений, приводящих к колоссальным потерям и массовой гибели людей. При этом к таким последствиям приводят не сами землетрясения, а разрушения зданий и сооружений. Половина федеральных округов Российской Федерации занимает 70 % территории страны, при этом более трети субъектов России, входящих в эти округа расположены на сейсмоопасных территориях.

Достоверная информация о сейсмостойкости сложившейся застройки на сейсмоопасных территориях отсутствует. Тем более, в условиях природно-техногенных процессов. Особенно это касается застройки, сформированной из многоквартирных зданий 1960–1980-х гг. постройки, которая превышает 500 млн м² в четырех федеральных округах Российской Федерации. По экспертным оценкам на эти многоквартирные дома приходится порядка 200 млн м² зданий с дефицитом сейсмостойкости и около 26 млн м² находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, и именно они станут главной угрозой для жизни и здоровья населения в случае возникновения сильных землетрясений.

Только в прошлом столетии на сейсмоопасных территориях СССР и современной России произошло шесть разрушительных землетрясений, погибло около 200 тыс. человек, был нанесен огромный экономический ущерб, сопоставимый с ущербом от военных действий.

После каждого разрушительного землетрясения происходит совершенствование строительных норм, принимаются меры по снижению будущих ущербов.

После Ташкентского землетрясения 1966 г. в СССР на урбанизированных территориях в крупных городах и столицах союзных республик, расположенных в сейсмически опасных регионах, с 1970 г. в союзных республиках были организованы инженерно-сейсмометрические станции (ИСС), которые располагались в зданиях и сооружениях. Особое значение имело то обстоятельство, что при этом изучалось поведение застройки в различных грунтовых условиях (инженерно-геологические, геоморфологические и гидрогеологические условия). На Кавказе такие наблюдения велись, в основном, на Южном Кавказе (Азербайджан, Армения, Грузия), в Иране и Турции [Zaalishvili, 2001; Zaalishvili et al., 2001]. Высокая сейсмическая активность Южного Кавказа обуславливала такой приоритет. На Северном Кавказе аналогичные наблюдения, проводились в Махачкале (Дагестан) и в Сочи.

Методология исследований

Экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Это обусловило использование результатов мониторинга движений объектов, обусловленных природными и техногенными воздействиями.

Известно, что именно экспериментальное исследование при его правильном планировании и корректном анализе полученных данных позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физиче-

ской системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках. Современная методика расчета на сейсмостойкость зданий и сооружений основана на спектральной теории. Основными данными последней являются спектры коэффициентов динамичности и формы колебаний зданий и сооружений, полученные при сильных землетрясениях [Bektas, Kegyes-Brassai, 2023]. В связи с указанным обстоятельством одной из основных задач на современном этапе развития теории сейсмостойкости является получение в достаточном количестве данных по колебаниям зданий и сооружений при сильных землетрясениях [Domaneschi et al., 2017; Mangalathu et al., 2020]. Задачей инженерно-сейсмометрической службы (ИСС) является получение информации о колебаниях сооружений и прилегающих участков грунта при землетрясениях [Рекомендации ... , 1984].

Инженерно-сейсмометрические станции в Грузии

В соответствии с постановлением Госкомитетов по науке и технике и строительству Совета Министров СССР, а также и Президиума Академии наук СССР за № 116/2 от 1967 г. на территории г. Тбилиси как столицы Грузинской ССР в начальный период намечалась организация 6-ти инженерно-сейсмометрических станций.

Ко времени принятия постановления Совета Министров Груз. ССР о выделении Институту строительной механики и сейсмостойкости (ИСМИС) АН Груз. ССР помещений в зданиях жилых домов и проектных институтов в г. Тбилиси для организации в них инженерно-сейсмометрических станций (ИСС), в новых застраиваемых районах города возводились в основном 8-этажные крупноблочные и 9-этажные крупнопанельные жилые здания и в старых районах – 10–15-этажные производственные железобетонные здания каркасного типа.

Грунтами основания зданий являлись коренные породы и глинистые грунты разной мощности, фундированные в зависимости от вида и состояния грунтов оснований на ленточных фундаментах или на плитах.

Инженерно-сейсмометрические станции в числе 10 (9 станций в г. Тбилиси и одна в г. Гори), начиная с 1970 г., были размещены в жилых и административно-производственных зданиях различных типовых конструкций.

Инженерно-сейсмометрическая станция ИИС 9 была установлена в районе новостроек «Цминда-Цкали» города Гори. Участок находится на территории первой левой надпойменной террасы р. Лиахви, сложенной мощной толщей обводненных галечников, покрытых тонким слоем суглинков.

Грунтами основания здания являются галечники с редкими валунами с песчаным заполнителем в количестве 15–30 %. Уровень грунтовых вод залегает на глубине 2,0–2,2 м от планировочной отметки. Здание представляет собой крупнопанельный трехсекционный 40-квартирный пятиэтажный жилой дом с чердачным перекрытием из сборных железобетонных плит. Фундаменты ленточные железобетонные заглубленные на 2,6 м от планировочной отметки. Крыша плоская, двухскатная к средней части здания.

В плане здание размером 59,4×10,5 м. Высота здания 18,0 м. Общий вид здания и вертикальный разрез приведены на рисунке 1.

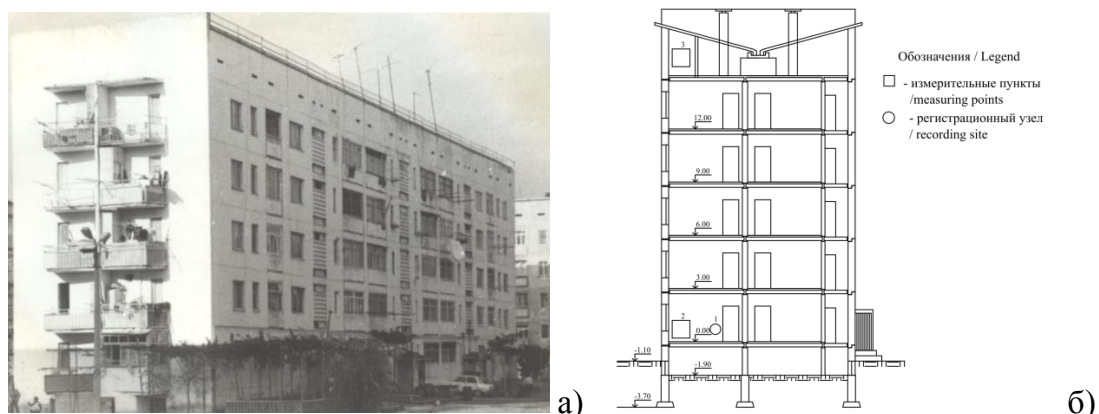


Рис. 1. Общий вид (а) и вертикальный разрез (б) здания ИСС № 9 /
 Fig. 1. General view (a) and vertical section (b) of the ISS No. 9 building

Измерительный пункт № 1 расположен во дворе на расстоянии 20 м от здания в специальной камере, заглубленной в грунты основания здания. В бункере (грунтовая точка) повышенная влажность из-за просачивания грунтовых вод. Измерительный пункт № 2 расположен в комнате на перекрытии первого этажа. Измерительный пункт № 3 размещен в чердачном помещении на перекрытии в специальной камере. Все пункты были оснащены сейсмическими приемниками: ВБП-3, С5С, СПМ-16 по осям x , y , z и ВЭГИК для запуска станции (рис. 2).

Регистрационный узел станции (рис. 2б) расположен в комнате первого этажа, рядом с измерительным пунктом № 1 и был оснащен приборами: осциллограф Н041 (4 шт.), гальванометр ГБ-IV (24 шт.), шунтовая коробка ШК-2 (4 шт.). Запуск системы осциллографов производится электронным пусковым устройством типа ПУ-1 с получением сигнала от сейсмоприемника типа ВЭГИК, расположенного в измерительном пункте № 1 и ориентированного по оси x . Время отработки станции после запуска 20 с. Скорость протяжки бумаги $v=40$ мм/с.

С целью устранения помех во время записи колебаний здания при землетрясениях осциллографы были установлены и закреплены на пружинах в специальном каркасе. Осциллографы снабжены гальванометрами типа ГБ-1У-10 и работали в ждущем режиме.

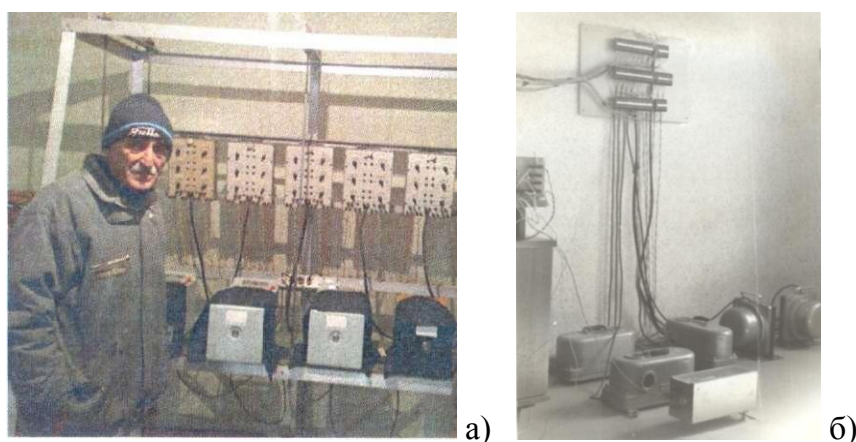


Рис. 2. Измерительный пункт (фото В.Б. Заалишвили, 2009) (а),
 регистрационный узел станции ИСС № 9 (б) /

Fig. 2. Measuring point (photo by V.B. Zaalishvili, 2009) (a), registration unit of ISS station No. 9 (b)

Станцией была получена аналоговая запись Рачинского землетрясения (29.04.1991 г.) (рис. 3). Для записи использовались сейсмоприемники ОСП-2. Запуск системы осциллографов производился электронным пусковым устройством типа ПУ-1 с получением сигнала от сейсмоприемника, расположенного в измерительном пункте № 1. По техническим причинам X-компонента измерительного пункта № 1 не сработала.

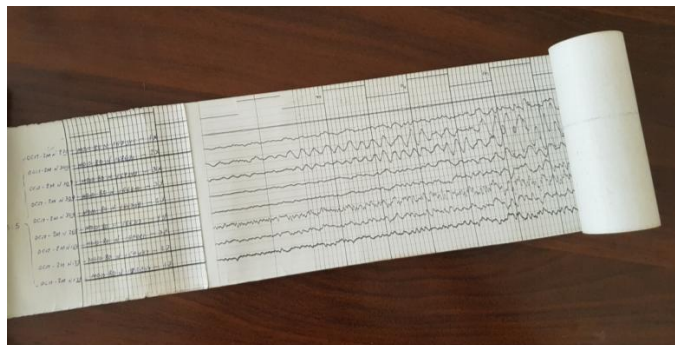


Рис. 3. Запись Рачинского землетрясения, полученная ИСС г. Гори /

Fig. 3. Recording of the Racha earthquake obtained by the engineering-seismological network of Gori

Для оцифровки аналоговых записей в ГФИ ВНЦ РАН разработан специальный алгоритм. Данный алгоритм был апробирован при оцифровке сейсмических записей схода ледника Колка 20 сентября 2002 года, полученных аналоговыми станциями России и Грузии. Результаты оцифровки представлены на рисунке 4. Далее строились спектры колебаний. Наибольший интерес представляла Y-компонента, т.к. она единственная горизонтальная компонента, записанная на всех трех измерительных пунктах. Наблюдается соответствие преобладающих частот (периодов) колебаний собственной частоте здания равной 4 Гц (0,25 с).

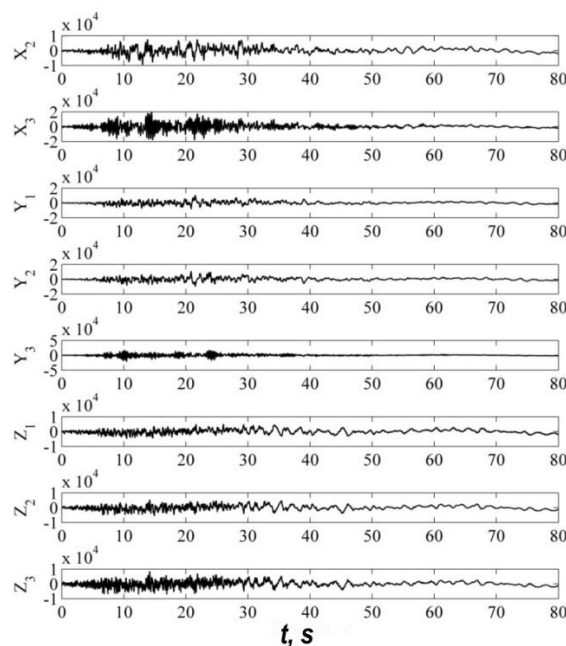


Рис. 4. Оцифрованные записи Рачинского землетрясения, полученные на инженерно-сейсмометрической станции ИСС 9 /

Fig. 4. Digitized records of the Racha earthquake obtained at the ISS 9 engineering seismometric station

Спектр реакции (ответа) – один из наиболее важных и широко используемых параметров в теории и практике расчетов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная более 80 лет назад, в настоящее время, концепция используется практически во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчету сооружений на сейсмостойкость.

Спектр реакции представляет собой зависимость максимальных амплитуд смещений (скоростей, ускорений) от периодов собственных колебаний системы с одной степенью свободы и позволяет оценивать реакцию системы (период собственных колебаний) на заданные сейсмические воздействия или огибающую сейсмических воздействий [Чернов, 2023, 2024]. В частности, в СНиП II-7-81* [Строительные ..., 2000] или в его актуализированной версии введено понятие «спектрального коэффициента динамичности» – β , который представляет собой отношение спектра реакции к максимальной амплитуде входящего воздействия.

По записи Рачинского землетрясения, записанной непосредственно на грунтах, был построен спектр реакции в диапазоне 0–10 с (рисунок 5а).

Полученные записи реакции одномассового осциллятора на внешнее воздействие сравнивались с инструментальной записью на чердачном перекрытии рассматриваемого здания. Для этого были построены спектры этих записей (рисунок 5б). Наибольшее совпадение спектра расчетной записи со спектром инструментальной наблюдается для коэффициента демпфирования $\xi=0,05$. Именно это значение, как правило, используется в практике сейсмостойкого строительства при расчете спектров реакции для зданий данного типа.

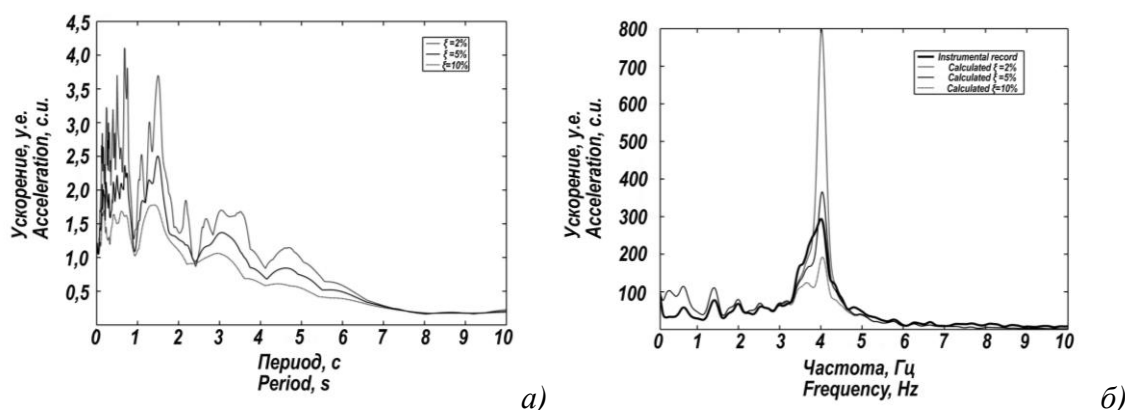


Рис. 5. Спектр реакции при различных значениях коэффициента демпфирования /
Fig. 6. Response spectrum for different damping coefficient values

Соответствие реакции одномассового осциллятора записям реального землетрясения показывает, что крупнопанельные здания являются жесткими конструкциями и, в первом приближении, с достаточной точностью могут рассматриваться в качестве одномассового осциллятора (во всяком случае, при этажности в пределах пяти).

Инженерно-сейсмометрические наблюдения на высотных зданиях в Москве

Одним из направлений обследования здания является разработка методов анализа колебаний зданий. Развитие аппаратных и вычислительных средств позволило при обследовании конструкций перейти от использования вынужденных колебаний (от вибромашин, взрывов, землетрясений) к регистрации микроколебаний,

возбуждаемых микросейсмами и ветровыми пульсациями (Патент RU 2242026 С1, 15.01.2004) [Острецов и др., 2004].

Возведение в Москве современных высотных зданий потребовало использования монолитных железобетонных конструкций, а не стальных (московские высотки 1950-х гг.) и в сложных грунтовых условиях широкого применения специальных плитных фундаментных конструкций. Немаловажным является необычное для мировой практики высотного строительства превалирование ветровых нагрузок над сейсмическими, что характерно для Русской платформы [Николаев и др., 2006]. К особенностям строительства можно также отнести достаточно сложные архитектурные объемно-планировочные решения зданий, создающие контрастную мозаику напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций.

Уточнение надежности принимаемых проектных решений потребовало проведения специализированных исследований, причем не на моделях или отдельных элементах конструкций, а натурных, для реальных зданий. По существу, была возрождена практика детального обследования работы конструкций (например, исследования Л.И. Корчинского при строительстве московских высоток 1950-х гг.). Отметим, что проведение таких работ было начато АО «ЦНИИЭП жилища» еще до появления концепции мониторинга высотных зданий. Накопленный к тому моменту опыт обследования высотных зданий позволил АО «ЦНИИЭП жилища» выступить в качестве головной организации при разработке соответствующих нормативов (например, МГСН 4.19-2005). Требования безопасности при строительстве и эксплуатации зданий обусловили создание ряда инструкций и нормативов не в результате традиционного обобщения опыта, а на основании модельных и теоретических представлений. В связи с этим, АО «ЦНИИЭП жилища», опираясь на уже полученные экспериментальные данные, выступал с критикой отдельных положений документов (например, устройство пунктов измерения колебаний каждые 5 этажей). Естественно, часть требований принятых документов оказалась излишней, другие важные моменты не были учтены, что привело к фактической отмене МГСН 4.19-2005 с заменой этих норм на ряд других. Опыт показал, что более эффективно регулировать безопасность при строительстве более общими документами – Федеральным законом (например, ФЗ № 384), ГОСТ Р 22.1.12-2005 (Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений – СМИС), а для каждого, по существу, индивидуального высотного здания или иного сложного сооружения разрабатывать Специальные технические условия (СТУ), в которых указываются виды мониторинга.

Этот путь, хотя и оказался более совершенным, но тоже не свободным от недостатков, которые проявляются, в первую очередь, в разделе СМИС, посвященном мониторингу конструкций (СМИК). Иллюстрацией является требование СМИК назначения уже в процессе проектирования «критических» значений контролируемых параметров, превышение которых является угрозой безопасности. Ясно, что, например, значения НДС, закладываемые в проект, и реальные различаются, хотя бы за счет обязательного запаса. Кроме того, требования этих норм не учитывают изменения параметров во времени, прежде всего, температурных. Следует учитывать также разброс в показаниях разных датчиков (особенно при измерении НДС), связанный с условиями их установки, например, необходимость «выставления» нулевого уровня. Мониторинг требует настройки после установки датчиков, «критические» значения не могут быть определены до их монтажа, т.е. при проектиро-

вании. Все эти особенности становятся ясными только после выполнения работ по мониторингу и обследованию зданий и анализа экспериментальных результатов.

Изменение состояния конструкций во времени

Мониторинг выполнялся как в процессе строительства, так и при эксплуатации. Ниже анализируются результаты, не связанные с ростом этажности, в частности, при монтаже конструкций тогда, когда возведение здания не проводилось – при длительной (более года) остановке строительства и после его завершения. Проанализируем изменение во времени трех типов параметров: собственных частот колебаний, деформаций основных несущих надземных конструкций и давления на грунт под фундаментной плитой.

Временной ход собственных частот колебаний здания иллюстрируется уникальными данными, полученными при мониторинге 44-этажного жилого дома «Эдельвейс» на Давыдовской ул. в Москве. Анализируется 12-летний ход, наблюдения начаты после завершения строительства в 2004 г. и ведутся по настоящее время с шагом по времени в 10 дней. Станция мониторинга расположена на 44-м этаже, ведется сейсмометрическая регистрация колебаний по трем направлениям (по осям плана и вертикали), а также пульсаций давления микробарографом у фасада [Острецов и др., 2005]. Существенно, что для выполнения этих работ был разработан оригинальный аппаратно-программный комплекс, который тиражировался и использовался для обследования состояния зданий – как пострадавших в результате аварий, так и архитектурных памятников [Антоновская и др., 2008].

На рисунке 6 приведены графики временного хода для основных собственных частот колебаний этого здания по разным осям плана f_1, f_2 . Отметим важные особенности кривых, существенные для понимания работы конструкций и для возможности выполнения нормативов (требования задания «критических» значений):

- значения частот собственных колебаний меняются во времени, основной тренд – убывание величин, на который накладываются периодические вариации;
- уравнение кривой основного тренда изменения частот также меняется во времени, изменения становятся все более слабыми. Тем не менее, значения частот изменились от первоначальных частот более чем на 20 %;
- после устранения тренда путем подбора аппроксимирующей кривой и ее вычитания, остается квазипериодический ход, соответствующий по времени и величинам сезонным температурным вариациям (расширению-сжатию монолитного железобетонного здания в целом), размах вариаций значений частоты – 2–3 %.

В течение примерно одного года после завершения строительства, уменьшение частоты колебаний было связано с осадками здания и формированием, так называемой присоединенной массы грунта к фундаментной плите [Острецов и др., 2006]. Дальнейшее уменьшение частоты может быть объяснено явлением ползучести бетона. В настоящее время существует несколько моделей ползучести, дающих разную зависимость частоты от времени. Сравнение кривых для набора моделей и экспериментально полученного тренда позволяет подобрать наиболее подходящую модель ползучести и, тем самым, верифицировать теоретические представления [Капустян и др., 2013]. Необходимо отметить, что модели ползучести были предложены исключительно на основании результатов испытаний относительно небольших железобетонных изделий. Состояние материала реального здания оценивалось впервые.

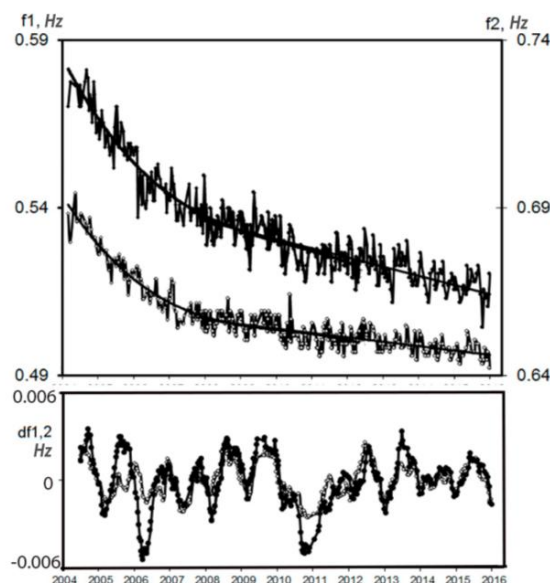


Рис. 6. Изменения во времени собственных частот колебаний высотного 44-этажного здания «Эдельвейс» в Москве (f_1, f_2 – сплошные и полые кружки соответственно) и вычисленные линии тренда (вверху), внизу – с вычитанием линии тренда [Капустян и др., 2013] /

Fig. 6. Changes over time in the natural frequencies of vibrations of the 44-story high-rise building “Edelweiss” in Moscow (solid and hollow circles, respectively) and calculated trend lines (top), bottom – with the subtraction of the trend line [Kapustyan et al., 2013]

Приведенный пример показывает, что задать «критические значения» при проектировании крайне сложно, более реальна длительная настройка мониторинга собственных колебаний, т.к. требуется учет будущих температурных вариаций и недостаточно хорошо изученного процесса ползучести. На основании нашего опыта и анализа литературных данных складывается представление о том, что использование значений собственных частот более эффективно не для мониторинга, а для обследования здания (пример приведен ниже).

Изменение НДС конструкций определяется путем установки деформометров. Для мониторинга высотного 48-этажного здания «Континенталь» на пр. Маршала Жукова в Москве была установлена сеть деформометров фирмы Sisgeo (Италия) в фундаментной плите, в стенах и пилонах первого этажа [Острецов и др., 2008]. Помимо решения многих методических вопросов, связанных с правильной установкой датчиков, их настройкой и определением временного шага снятия показаний [Таракановский и др., 2010], были получены данные о работе конструкций при строительстве и эксплуатации; остановимся на главных результатах:

– мониторинг в процессе возведения, для оценки НДС характеризующийся известным законом роста нагрузок (график строительства), позволяет верифицировать показания датчиков и отсеять «плохие». Наиболее информативными для оценки состояния конструкций являются датчики в пилонах, т.к. их показания связаны достаточно простыми зависимостями с изменением нагрузок. Показания датчиков в стенах и, тем более, в фундаментной плите отображают перераспределение напряжений между конструкциями, а для фундаментной плиты – также и между зданием и грунтом. Таким образом, установка датчиков деформации в стенах и фундаментной плите малоэффективна для мониторинга;

– деформометры в пилонах (как правило, нижних этажей) являются эффективным инструментом мониторинга – они позволяют измерять деформации, которые соответствуют прилагаемым нагрузкам, причем величины достаточно хорошо согласуются с проектными значениями. Это положение хорошо иллюстрирует рисунок 7, где показан в сравнении с расчетными кривыми временной ход деформаций в пилонах 1-го этажа при мониторинге в процессе строительства (рост нагрузок) и при его остановке на год. Обратим внимание на ярко выраженный сезонный температурный ход при остановке строительства, составляющий до 20 %. Такие большие вариации получены из-за того, что строительство не было завершено, конструкции были подвержены внешним атмосферным воздействиям. Расчет температурных деформаций соответствует экспериментально полученным данным.

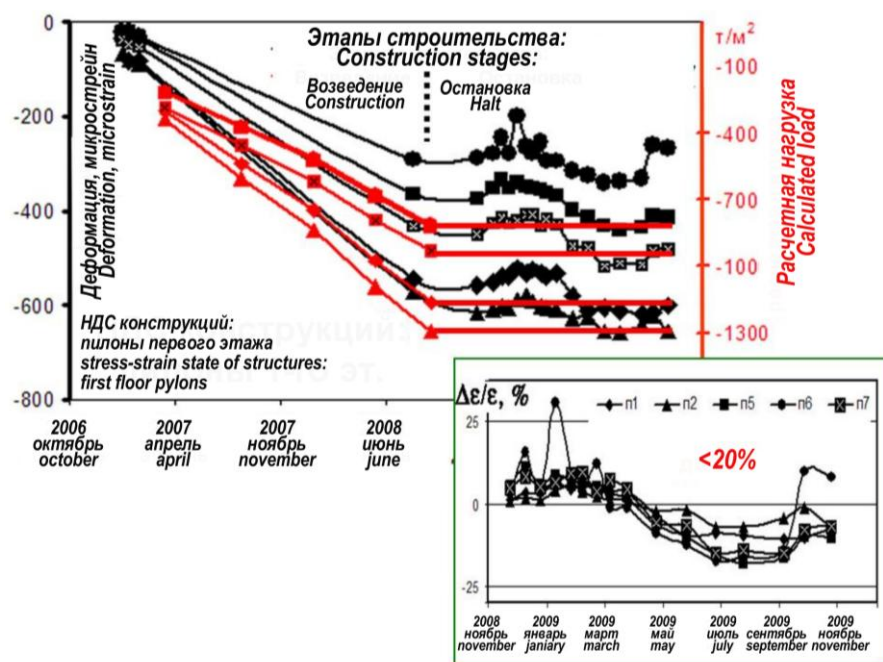


Рис. 7. Изменение во времени деформаций в пилонах 1-го этажа высотного корпуса «Континенталь», Москва: сверху – в сравнении с расчетными значениями, внизу – вариации при остановке строительства /

Fig. 7. Changes in deformations over time in the pylons of the 1st floor of the Continental high-rise building, Moscow: top – in comparison with the calculated values, bottom – variations when construction was stopped

Пространственно-временные изменения параметров при мониторинге, взаимодействие здания с грунтами основания

В отличие от закономерностей работы конструкций, которые в основном известны и предсказуемы, состояние грунтов основания определяется значительно более сложными закономерностями и многими факторами (геологическим строением, гидрологией, распределением нагрузок и пр.). Одним из способов получения пространственно-временной картины НДС на контакте фундаментная плита-грунт является установка сети датчиков давления на грунт [Заалишвили и др., 2022].

Для высотных зданий, возведенных по проектам Института, с плитной фундаментной конструкцией была реализована схема мониторинга с датчиками давления

под плитой. Наиболее представительные результаты получены для рассматривавшегося выше объекта «Континенталь». На рисунке 8 приведена картина изменения во времени величин разности между реальными и расчетными значениями давления на грунт при строительстве дома. Отчетливо видно следующее:

- превышение реальных нагрузок над расчетными наблюдается тогда, когда здание из «высокого» становится «высотным», т.е. количество этажей проходит рубеж более 20 этажей. Незначительное увеличение при 8 этажах соответствует отпору грунта при большом котловане здания. Отметим, что регистрация отпора грунта показывает чувствительность методики;
- яркое пятно больших реальных давлений достаточно компактно и соответствует зоне, в которой была зафиксирована повышенная фильтрация воды из-за размыкания стены в грунте;
- по абсолютным величинам отмеченная разница невелика – 100 кПа, что составляет не более 20 % от значения давления в этой зоне.

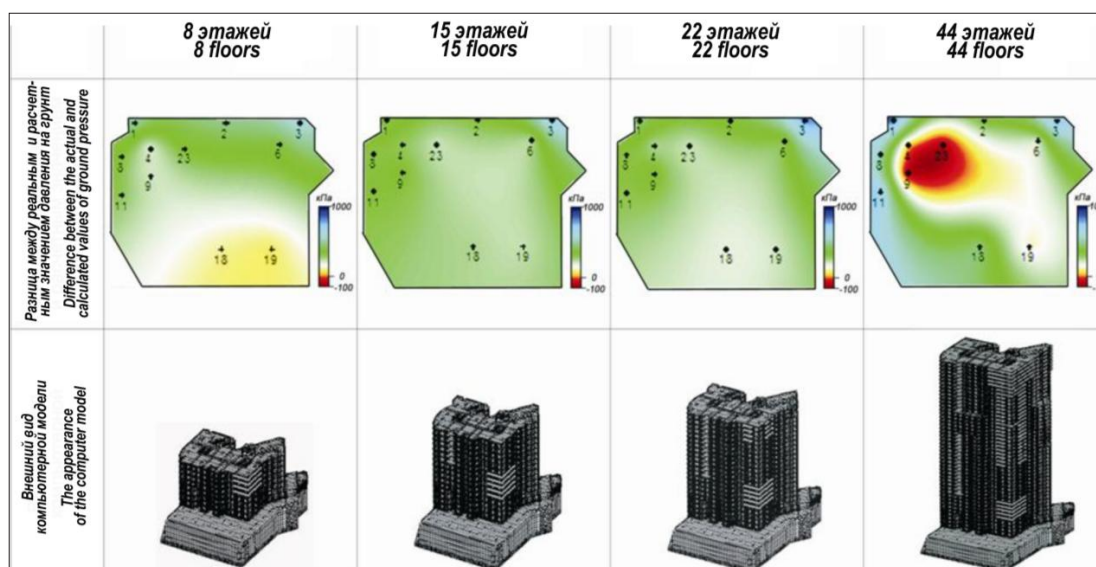


Рис. 8. Мониторинг в процессе строительства: сверху поля разностей между реальными и расчетными значениями давления на грунт под фундаментной плитой, внизу – соответствующие этапы возведения, «Континенталь», Москва /

Fig. 8. Monitoring during construction: at the top are the fields of differences between the actual and calculated values of pressure on the ground under the foundation slab, at the bottom are the corresponding stages of construction, Continental, Moscow

Важным вопросом осуществления безопасности здания по результатам мониторинга является выяснение того, как быстро проявляются изменения параметров в зависимости от природы происходящих процессов. Известно, что здание находится постоянно в изменении, например, перемещения вследствие ветровых нагрузок, особенно в верхней части здания, могут быть достаточно большими, но это не опасный процесс. Рассмотрим связь величин давления на грунт и осадки здания – явно взаимосвязанных параметров. На рисунке 10 приведены три кривые, построенные по данным с датчиков давления на грунт и со скважинных датчиков осадок, расположенных по диагонали фундаментной плиты, причем одна точка (2) – под высотной частью здания. Кривые подобны по форме, но демонстрируют достаточно сложную зависимость, отличающуюся от ожидаемого «плавного хода». Например, отчетливо

видна ситуация, когда давление растет, а осадки нет или она даже уменьшается. Это происходит на ранних стадиях строительства и соответствует отпору грунта.

Для того чтобы понять с чем связаны отклонения от плавного хода, была проведена процедура вычисления тренда (плавного хода, например, показан пунктиром для кривой 2 на рисунке 9) и отклонений от него (флуктуаций давления). Существенно, что для каждого датчика будет свой тренд и свой набор флуктуаций. Нами анализировались карты трендов и флуктуаций, т.е. для каждого заданного момента времени распределения значений по площади фундаментной плиты [Таракановский и др., 2010]. Важная информация об изменении состояния грунтов была получена при остановке строительства более чем на год, когда не было полной нагрузки на грунт от здания, и ход осадки был минимальный. На рисунке 9 показаны карты флуктуаций давления на грунт для разных моментов времени при остановке строительства. Мы можем наблюдать достаточно интересное явление – давление на грунт меняется, причем неравномерно по площади. Наиболее «спокойная картина – зимой, наиболее контрастная – летом, вариации доходят до 50 % от трендового значения. Более того, вариации имеют отчетливую периодичность около 1 года (подобные карты показаны стрелками). Отметим также, что появление пятен неравномерного распределения по площади значений давления объясняет отклонение кривой рисунка 9 от «плавного хода» – мы наблюдаем явление перераспределения давления в пространстве. Нечто подобное наблюдается и по данным тензодатчиков в фундаментной плите, но связать их с полями значений с датчиков давления не просто, т.к. тут играет роль перераспределение деформаций в конструкциях фундаментной плиты.

Природа отмеченного явления в грунте пока не ясна, но сам факт такой мозаичной и достаточно сильной вариации, как давления на грунт, так и деформаций в плите ставит под сомнение эффективность задания «критических значений» параметров до строительства и затем автоматического объявления опасной ситуации при их превышении, как этого требует норматив.

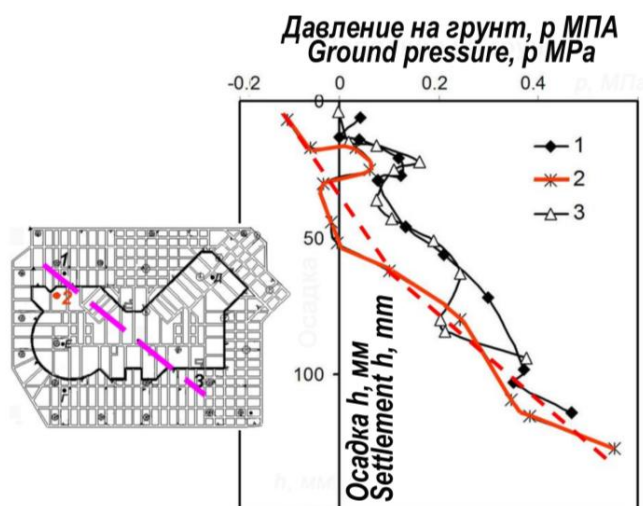


Рис. 9. Экспериментальные кривые соотношения давления на грунт и осадки по данным датчиков давления 1...3 и интегральной осадки, расположение датчиков показано на схеме плиты, «Континенталь», Москва /

Fig. 9. Experimental curves of the relationship between ground pressure and settlement based on data from pressure sensors 1...3 and integral settlement, the location of the sensors is shown on the slab diagram, Continental, Moscow

Обследование зданий с использованием собственных колебаний

Существует мнение, что выполнение непрерывного мониторинга высотных зданий с использованием частот собственных колебаний малоэффективно, и более эффективно использование этого параметра при обследованиях. С другой стороны, непрерывные наблюдения колебаний, например, высотных арочных плотин целесообразны и дают оценку их состояния при разных типах воздействий – сейсмических, техногенных и пр. [Антоновская и др., 2015]. Это связано с тем, что, в отличие от высотных зданий, влияние геологической среды и закрепление сооружения в ней у плотин существенно большее, а именно закрепление определяет значительную долю возможных вариаций собственных частот.

Для того чтобы понять как влияет на изменение собственных частот состояние здания, нами было выполнено натурное и компьютерное моделирование. В качестве модели было выбрано здание простой формы и сильно разрушенное. Это – памятник архитектуры Преображенская гостиница на Соловках (рис. 10). Здание 3-этажное, сохранились стены практически без перекрытий (частично на 1 эт.). Материал стен – сильно выветрелая кирпичная кладка. Фундамент – валунный, мало-заглубленный. Визуальное обследование обнаруживает значительные трещины, по существу, разделяя здание на блоки. Сейсмометрическое обследование проводилось методом собственных колебаний путем установки датчиков на подоконниках 2-го этажа вдоль фасадов, наблюдения повторены с интервалом в год при разных состояниях грунтов оснований (сухое и дождливое лето). По результатам обмеров и визуального обследования была составлена расчетная модель с определением частот и форм собственных колебаний (рис. 10).

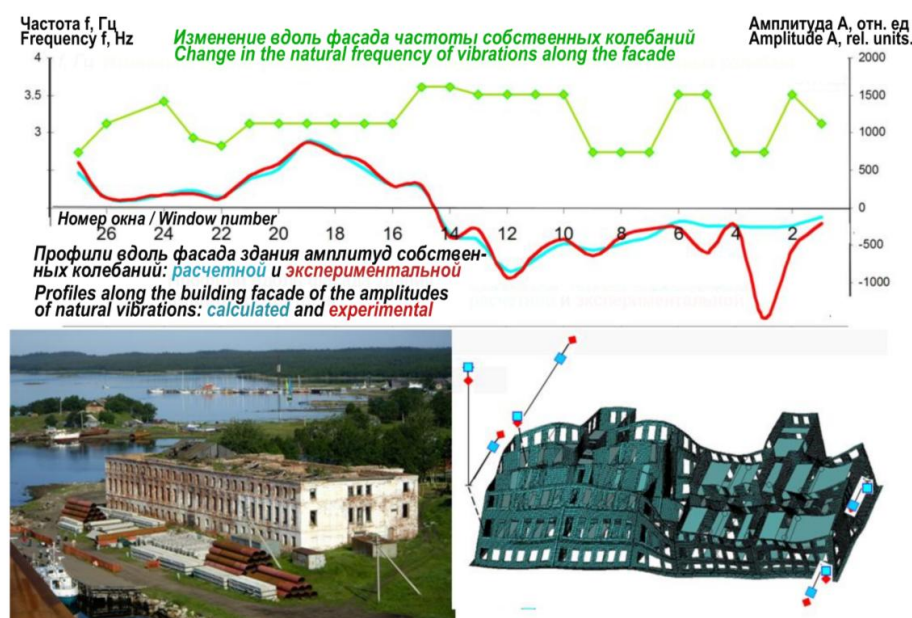


Рис. 10. Сейсмометрическое обследование Преображенской гостиницы на Соловках (фото), внизу – расчетная модель, сверху – профиль вдоль главного фасада значений расчетных и экспериментальных значений амплитуд собственных частот колебаний и экспериментально полученных частот /

Fig. 10. Seismometric survey of the Preobrazhenskaya Hotel on Solovki (photo), below is the calculation model, above is the profile along the main facade of the calculated and experimental values of the amplitudes of natural frequencies of oscillations and experimentally obtained frequencies

Обработка данных сейсмометрического обследования показала, что доминирующие значения собственных частот при измерениях в разных частях здания различаются (рис. 10, кривая значений частот вдоль фасада). Анализ результатов расчета для модели показал, что значения собственных частот разных форм близки. Мы наблюдаем суперпозицию разных форм колебаний, причем в зависимости от свойств блоков здания, доминирует по амплитуде та или иная форма, определяя тем самым, определяемое по записи значение собственной частоты. Учитывая это, было проведено сложение основных расчетных форм колебаний, в результате чего был получен расчетный профиль колебаний на собственных частотах, который сравнивался с экспериментальным (рис. 10).

Сравнение кривых показывает их хорошее совпадение, кроме отдельных точек, где, по-видимому, были плохие условия установки датчика (разбитый подоконник). По другой оси плана и по вертикали также получено совпадение значений (показано на модели рис. 10).

Результаты обследований с интервалом в год различаются мало, т.е. роль верхней части грунтового массива незначительна. Кроме того, внесение в модель трещин практически не повлияло на результат. Все это указывает на то, что собственные колебания отражают интегральные свойства НДС конструкций; с их помощью можно достаточно точно создать модель реального здания, пригодную, например, для реставрации, но нельзя отследить появление и развитие трещины. Этот вывод подтверждает и тот факт, что сейсмометрическое обследование бетонной арочной плотины Саяно-Шушенской ГЭС не выявило в картине колебаний присутствия деформационных швов [Еманов и др., 2002].

Обсуждение результатов

Получение достоверной информации о сейсмостойкости существующей застройки является наиболее актуальной задачей, это в первую очередь касается жилищного фонда, сформированного из многоквартирных домов типовых серий 1960–1980-х гг. постройки. Известно, что именно экспериментальное исследование позволяет наиболее надежно определять безопасный потенциал здания, сооружения или любой физической системы при сейсмических, динамических и иных нагрузках.

Полученные инженерно-сейсмометрическими станциями записи поведения типовых зданий при сейсмических воздействиях, практически в той или иной мере учитывались при их возведении, поскольку данные сети располагались в новостройках, и представляют собой уникальный инструментальный материал, позволяющий производить сопоставление исходного состояния с их текущим состоянием.

Благодаря этому многое в поведении зданий и сооружений стало понятным. В этой связи необходимо отметить, что при сильнейшем землетрясении (Япония, 2011 г.) большинство жертв было обусловлено цунами.

Выводы

После Ташкентского землетрясения 1966 г. в б. СССР в крупных городах и столицах союзных республик, расположенных в сейсмически опасных регионах, с 1970 г. организовывались инженерно-сейсмометрические станции, которые располагались в зданиях и сооружениях. Каждая сейсмограмма представляет собой уникальную запись реального воздействия на отдельные элементы и здания, в це-

лом. В качестве примера приведена запись Рачинского землетрясения 1991 года, полученная на крупнопанельном трехсекционном пятиэтажном жилом здании при 7-балльном проявлении, в г. Гори при Рачинском землетрясении от 29 апреля 1991 г. (Грузия). Станции работали в ждущем режиме, поскольку регистрация осуществлялась на кассеты с фотобумагой. Современные цифровые станции могут работать практически непрерывно, что исключает потерю информации.

Наиболее эффективным представляется объединение системы, регламентирующей мониторинг уникальных объектов, при котором регистрируются собственные колебания конструкций, с возможностью регистрации сильных сейсмических воздействий.

Анализ полученных результатов инструментального мониторинга современных строительных конструкций позволяет выявить наиболее важные особенности работы конструкций, не учитываемые в настоящее время Нормами.

Инженерно-сейсмометрические сети, которые можно рассматривать как геофизический метод контроля опасных природно-техногенных процессов на урбанизированных территориях, должны стать основой разработки научных и методологических основ комплексной оценки и выявления зон повышенной природно-техногенной опасности и рисков урбанизированных территорий (городов и населенных пунктов в составе агломераций, иных объектов градостроительной деятельности), расположенных в сейсмических зонах для повышения эффективности реализации задач комплексного устойчивого развития таких территорий.

Литература

1. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Инженерно-сейсмометрические возможности при проведении реставрационных работ. // Труды 3-го Международного научно-практического симпозиума «Природные условия строительства и сохранения храмов Православной Руси». Сергиев Посад, 2008. – С. 59–61.
2. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Рогожин Е.А. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения. // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51. № 1. – С. 5–15.
3. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П. Инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений стоячими волнами. // Материалы восьмой международной конференции «Глубинное строение и геодинамика Фенноскандии, окраинных и внутриплатформенных транзитных зон». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2002. – С. 92–94.
4. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Никонова Н.В., Смирнова Л.Н., Уздин А.М. Характеристики пространственной неоднородности поля ускорений дневной поверхности. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. № 1. – С. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006.
5. Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Климов А.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании. // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С. 6–12.
6. Николаев С.В., Капустян Н.К., Кальчук В.Г. Опыт исследования ветровых и сейсмических нагрузок в условиях высотного строительства г. Москвы. // «Будівельні конструкції». Вып. 64. Киев: НДІБК, 2006. – С. 61–64.
7. Острцов А.В., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Опыт мониторинга конструкций и грунтов оснований высотных зданий в Москве. // Строительная наука и техника. – 2008. – № 5(20). – С. 99–101.
8. Острцов В.М., Гендельман Л.Б., Дыховичная Н.А., Вознюк А.Б., Болдырев С.С., Капустян Н.К. Опыт тестирования состояния конструкций высотных зданий методом ре-

гистрации собственных колебаний. // Железобетонные конструкции зданий большой этажности. М.: МГСУ, 2004. – С. 86–95.

9. Острцов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К. Станция стационарного мониторинга высотного здания: оборудование и опыт эксплуатации. // Уникальные и специальные технологии в строительстве (UST-Build 2005). М.: Дом на Брестской, 2005. – С. 86–90.

10. Острцов В.М., Капустян Н.К., Вознюк А.Б. Мониторинг высотного 44-этажного жилого дома на Давыдовской улице. // «Технологии, машины, оборудование, материалы и нормативное обеспечение для подземного и высотного строительства». Т. 2. «Высотное строительство». М.: КДЦ «Гостиный двор», 2006. – С. 17–19.

11. Рекомендации по организации и эксплуатации станций инженерно-сейсмометрической службы (ИСС). М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1984. – 74 с.

12. Строительные нормы и правила «Строительство в сейсмических районах» СНиП II-7-81* / Госстрой России. М.: ГУПЦПП, 2000. – 44 с.

13. Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н. Инструменты и возможности мониторинга процессов в грунтах основания высотных зданий в Москве. // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2010. – № 6. – С. 551–562.

14. Чернов Ю.К. Об оценках спектров колебаний и спектральных характеристик грунтов для вероятностного анализа сейсмической опасности территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 2. – С. 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006.

15. Чернов Ю.К. Опыт экспресс-оценок спектров реакции по спектрам Фурье ускорений колебаний грунта при землетрясениях. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 4. – С. 113–127. DOI:10.46698/VNC.2024.44.23.010.

16. Bektas N., Kegyes-Brassai O. Development in machine learning based rapid visual screening method for masonry buildings. In: Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. / Eds. M.P. Limongelli, P.F. Giordano, S. Quqa, C. Gentile, A. Cigada. – Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. – p. 411–421.

17. Domaneschi M., Sigurdardottir D., Glisic B. Damage detection on output-only monitoring of dynamic curvature in composite decks. // Structural Monitoring and Maintenance. – 2017. – Vol. 4. Issue 1. – pp. 1–15.

18. Mangalathu S., Sun H., Nweke C.C., Yi Z., Burton H.V. Classifying earthquake damage to buildings using machine learning. // Earthquake Spectra. – 2020. – Vol. 36. – pp. 183–208. DOI: 10.1177/8755.

19. Zaalishvili V. Strong motion in absorbing nonlinear medium and problems of their registration. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul, 2001. – pp. 611–621.

20. Zaalishvili V., Timchenko I., Kacharava V., Zaalishvili Z. Strong motion instrumentation for structures of civil engineering and economical aspects of planning of territory of big cities. Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul, 2001. – pp. 599–612.

References

1. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Basakina I. M. Engineering and seismometric capabilities in carrying out restoration work. In: Proc. of the 3rd Int. Scientific and Practical Symp. “Natural conditions for the construction and preservation of Churches of Orthodox Russia”. Sergiev Posad. 2008. pp. 59–61. (In Russ.)
2. Antonovskaya G. N., Kapustyan N. K., Rogozhin E. A. Seismic monitoring of industrial facilities: problems and solutions. Seismic Instruments. 2015. Vol. 51. No. 1. pp. 5–15. (In Russ.)
3. Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Danilov I.A., Kuzmenko A.P. Engineering and seismological studies of buildings and structures by standing waves. In: Proc. of the Eighth Int. Conf. “Deep structure and geodynamics of Fennoscandia, marginal and intraplateau transit zones”. 2002. pp. 92–94. (In Russ.)

4. Zaalishvili V.B., Melkov D.A., Nikonova N.V., Smirnova L.N., Uzdin A.M. Characteristics of spatial inhomogeneity of the acceleration field on the day surface. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No. 1. pp. 75–88. DOI: 10.46698/VNC.2022.74.27.006. (In Russ.)
5. Kapustyan N.K., Antonovskaya G.N., Klimov A.N. High-rise buildings: monitoring experience and ways of using it in design. *Housing Construction*. 2013. No. 11. pp. 6–12. (In Russ.)
6. Nikolaev S.V., Kapustyan N.K., Kalchuk V.G. Experience in studying wind and seismic loads in high-rise construction conditions in Moscow. In: “Budyvelni konstruktsii”. Issue 64. Kiev. NDIBK. 2006. pp. 61–64. (In Russ.)
7. Ostretsov A.V., Voznyuk A.B., Kapustyan N.K. Experience in monitoring structures and soils of the foundations of high-rise buildings in Moscow. *Construction Science and Technology*. 2008. No. 5(20). pp. 99–101. (In Russ.)
8. Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Dykhovichnaya N.A., Voznyuk A.B., Boldyrev S.S., Kapustyan N.K. Experience in testing the state of high-rise building structures by recording natural vibrations. In “Reinforced Concrete Structures of High-Rise Buildings”. Moscow. MGSU. 2004. pp. 86–95. (In Russ.)
9. Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Voznyuk A.B., Kapustyan N.K. Stationary monitoring station for a high-rise building: equipment and operating experience. In: *Unique and Special Technologies in Construction (UST-Build 2005)*. Moscow. Dom na Brestskoy. 2005. pp. 86–90. (In Russ.)
10. Ostretsov V.M., Kapustyan N.K., Voznyuk A.B. Monitoring of a high-rise 44-story residential building on Davydovskaya street. “Technologies, Machines, Equipment, Materials, and Regulatory Support for Underground and High-Rise Construction.” Vol. 2 “High-Rise Construction”. Moscow. Gostiny Dvor. 2006. pp. 17–19. (In Russ.)
11. Recommendations for the Organization and Operation of Seismometric Service Stations (ISS). Moscow. Kucherenko Central Research Institute of Steel Structures. 1984. 74 p.
12. Building Codes and Regulations “Construction in Seismic Areas” SNiP II-7-81*. Gosstroy of Russia. Moscow. GUPTsPP. 2000. 44 p. (In Russ.)
13. Tarakanovsky V.K., Kapustyan N.K., Klimov A.N. Tools and capabilities for monitoring processes in the foundation soils of high-rise buildings in Moscow. *Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2010. No. 6. pp. 551–562.
14. Chernov Yu.K. On estimates of vibration spectra and spectral characteristics of soils for probabilistic seismic hazard analysis of territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 67–81. DOI: 10.46698/VNC.2023.67.36.006. (In Russ.)
15. Chernov Yu.K. Rapid estimates experience of reaction spectra based on Fourier spectra of accelerations of ground motions during earthquakes. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 4. pp. 113–127. DOI: 10.46698/VNC.2024.44.23.010. (In Russ.)
16. Bektas N., Kegyes-Brassai O. Development in machine learning based rapid visual screening method for masonry buildings. In: *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*. Eds. M.P. Limongelli, P.F. Giordano, S. Quqa, C. Gentile, A. Cigada. Cham. Springer Nature Switzerland. 2023. p. 411–421.
17. Domaneschi M., Sigurdardottir D., Glisic B. Damage detection on output-only monitoring of dynamic curvature in composite decks. *Structural Monitoring and Maintenance*. 2017. Vol. 4. Issue 1. pp. 1–15.
18. Mangalathu S., Sun H., Nweke C.C., Yi Z., Burton H.V. Classifying earthquake damage to buildings using machine learning. *Earthquake Spectra*. 2020. Vol. 36. pp. 183–208. DOI: 10.1177/8755.
19. Zaalishvili V. Strong motion in absorbing nonlinear medium and problems of their registration. *Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures*. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul. 2001. pp. 611–621.
20. Zaalishvili V., Timchenko I., Kacharava V., Zaalishvili Z. Strong motion instrumentation for structures of civil engineering and economical aspects of planning of territory of big cities. *Strong motion instrumentation for Civil Engineering Structures*. In: Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. Istanbul. 2001. pp. 599–612.