

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 119–131.

Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 119–131.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 699.841

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-119-131

Инженерно-сейсмометрический мониторинг для расчета конструкций, прогноза сейсмостойкости и обеспечения сохранности гражданских объектов при эксплуатации

Гурьев Владимир Владимирович (Москва). Доктор технических наук, профессор. Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (119331, Москва, просп. Вернадского, д. 29. ЦНИИП Минстроя России). Эл. почта: 89150902767@mail.ru

Дорофеев Владимир Михайлович (Москва). Кандидат физико-математических наук. Специализированное научно-техническое предприятие «ПРОФИНЖ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22, стр. 3. ПРОФИНЖ). Эл. почта: vmd2021@yandex.ru

Булыкин Владислав Игоревич (Москва). ППК «Фонд развития территорий» (115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 5. Фонд развития территорий). Эл. почта: vi.bulykin@fondrt.ru

Аннотация. Обобщены опыт и технологии, полученные при развитии экспериментальных методов исследования сейсмических воздействий на строительные конструкции и интерпретации данных инженерно-сейсмометрического мониторинга гражданских объектов.

Рассмотрены методы оценки сейсмических воздействий на строительные объекты, вопросы, связанные с выявлением резерва сейсмостойкости конструкций с помощью инженерно-сейсмометрического мониторинга эксплуатируемых объектов, а также решение обратных задач для расчётных моделей сейсмостойкости строительных конструкций.

Особое внимание уделено перспективам развития цифровых технологий контроля динамических параметров конструкций при сейсмических нагрузках. Предложена структура единой цифровой системы эксплуатационного инженерно-сейсмометрического мониторинга гражданских объектов для прогноза сейсмостойкости и обеспечения сохранности городской застройки на сейсмически активных урбанизированных территориях Российской Федерации.

Ключевые слова: землетрясение, строительные объекты, сейсмостойкость, сейсмические воздействия, методы оценки, прогноз последствий, инженерно-сейсмометрический мониторинг, обратные задачи, резерв сейсмостойкости, автоматизированные станции

Для цитирования. Гурьев В.В., Дорофеев В.М., Булыкин В.И. Инженерно-сейсмометрический мониторинг для расчета конструкций, прогноза сейсмостойкости и сохранения гражданских объектов при эксплуатации // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 119–131. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-119-131.

Engineering Seismometric Monitoring for Calculation Structures, Prediction of Seismic Resistance and Maintenance Civil Objects in Operation

Guryev Vladimir V. (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Professor. Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia (29 Vernadskogo Prospekt, Moscow, 119331. TsNIIP Minstroyi of Russia). E-mail: 89150902767@mail.ru

Dorofeev Vladimir M. (Moscow). Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher. Specialized Scientific and Technical Enterprise "PROFINZH" (22 Boytsovaya st., building 3, Moscow, 107150. PROFINZH). E-mail: vmd2021@yandex.ru

Bulykin Vladislav I. (Moscow). PPK "Fund for Territorial Development" (5 Sharikopodshipnikovskaya st., Moscow, 115088. Fund for Territorial Development). E-mail: vi.bulykin@fondrt.ru

Abstract. The experience and technologies obtained during the development of experimental methods for studying seismic impacts on building structures and interpreting data from engineering seismometric monitoring of civil facilities are summarized.

Methods of assessing seismic impacts on construction objects, issues related to identifying the reserve of seismic resistance of structures using engineering seismometric monitoring of operated objects, as well as solving inverse problems for computational models of seismic resistance of building structures are considered.

Particular attention is paid to the prospects for the development of digital methods for monitoring dynamic parameters of structures under seismic loads. The structure of a unified digital system of operational engineering seismometric monitoring of civil facilities to predict earthquake resistance and ensuring the safety of urban development in urbanized seismic territories of the Russian Federation is proposed.

Keywords: earthquake, construction objects, seismic resistance, seismic impacts, assessment methods, forecast of consequences, engineering seismometric monitoring, inverse problems, earthquake resistance reserve, automated stations

For citation. Gur'ev V.V., Dorofeev V.M., Bulykin V.I. Engineering Seismometric Monitoring for Calculation Structures and Prediction of Seismic Resistance of Civil Objects in Operation. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 3, pp. 119–131, doi: 10.22337/2077-9038-2023-3-119-131.

Введение

Ущерб от землетрясений в целом по миру, связанный в основном с разрушением объектов гражданского строительства, превышает ущерб от всех остальных природных катастроф. Очередным трагическим примером явилось турецко-сирийское землетрясение, произошедшее в феврале 2023 года, которое в результате разрушения свыше 5700 гражданских объектов унесло около 60 тыс. человеческих жизней. Мировая статистика свидетельствует, что в первую очередь разрушаются объекты жилого фонда и социальной инфраструктуры: старая жилая застройка, несейсмостойкие здания и сооружения, а также объекты, утратившие сейсмостойкость в процессе эксплуатации.

Следует отметить, что сильные землетрясения на се-литбных территориях наблюдаются сравнительно редко, например, последнее катастрофическое землетрясение интенсивностью свыше 9 баллов по шкале MSK 64 в Российской Федерации произошло на Сахалине около тридцати лет назад. Напротив, сейсмические колебания относительно слабой интенсивности (4–6 баллов), как правило, не ощущаемые и регистрируемые, только приборами, возникают на сейсмоопасных территориях гораздо чаще – более ста раз в год [1], однако их постоянные воздействия на эксплуатируемые объекты вызывают в материале конструкций усталостные явления, сопровождающиеся накоплением внутренних повреждений и приводящие к изменению физического состояния конструкций. Эти повреждения визуально не всегда обнаруживаются и могут приводить к саморазрушению конструкций. В результате возникает так называемый дефицит сейсмостойкости строительных объектов. Иными словами, здания и сооружения на сейсмически активных территориях «стареют» гораздо быстрее.

В нашей стране на этих территориях находятся 29 субъектов, современная застройка которых представлена как новыми современными строениями, включая уникальные объекты, так и огромным постсоветским жилым фондом, состоящим из 5-8- и 9-12-этажных многоквартирных домов массовых типовых серий, построенных в период 1960-х – 1980-х годов прошлого века общей площадью, превышающей 500 млн кв. м. К ним относятся крупнопанельные и крупноблочные жилые дома, каркасно-панельные, панельно-блочные, кирпичные, с применением местных строительных материалов и др. По предварительной экспертной оценке, в этом объёме порядка 143 млн кв. м приходится на объекты жилищного фонда с дефицитом сейсмостойкости, что, в случае признания их не пригодными для проживания, многократно (более чем на 620 %) увеличит аварийный фонд страны и потребует колоссальных (порядка 12 трлн рублей) затрат на расселение, и эти здания представляют главную угрозу при ближайшем сильном землетрясении [2].

Эффективность решения проблемы повышения надёжности строительных объектов и снижения рисков возникновения ущерба при землетрясениях связаны прежде всего с двумя факторами: совершенствованием методов проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, опирающихся на точные расчётные модели, и оперативной достоверной информацией об остаточном ресурсе эксплуатируемых зданий и сооружений. При этом первый фактор в основном касается нового строительства, в котором закладывается надёжность (сокращение ущерба) объектов, обеспечивающая их безопасность при землетрясениях после возведения, а второй в большей степени направлен на предотвращение ущерба при возможном ближайшем землетрясении за счёт превентивного повышения остаточного ресурса эксплуатируемых объектов.

При решении данных задач необходимо учитывать баланс оптимального сочетания расходов на повышение сейсмостойкости объектов, составляющих от 10% и более в зависимости от социальной значимости и категории объекта.

Поэтому более глубокое изучение процессов, происходящих в основании и конструкциях зданий и сооружений при землетрясениях, развивающее научные представления как о сейсмических воздействиях и реальной работе строительных конструкций, так и о характере изменения их сейсмостойкости при эксплуатации, повышает достоверность информации о безопасности объектов на сейсмических территориях. Это в свою очередь обеспечивает научную основу для совершенствования методов проектирования, адекватно отражающих реальное поведение зданий и сооружений при сейсмических воздействиях, а также методов диагностики эксплуатируемых объектов, отражающих реальные изменения динамических параметров при сейсмических колебаниях для определения их остаточной сейсмостойкости и разработки инновационных технологий по усилению и защите конструкций.

Целью настоящей работы является обобщение опыта и технологий, полученных при развитии экспериментальных методов исследования сейсмических воздействий и интерпретации данных инженерно-сейсмометрического мониторинга строительных объектов, для развития методологической базы оценки резерва сейсмостойкости и систем сейсмозащиты при их эксплуатации, а также совершенствования расчётных моделей повышения сейсмостойкости при проектировании и новом строительстве.

Методы оценки сейсмических воздействий на строительные объекты

Сейсмические воздействия применительно к застроенной территории представляют собой пространственную совокупность горизонтальных и вертикальных колебательных движений грунта с различными спектрами, интенсивностью, продолжительностью и периодичностью возникновения,



Рис. 1. Стенд УСП-300 с управляемыми импульсно-вибрационными приводами (источник: <https://сферанефтьгаз.рф/upload/company/cksi/2016-5/ris7-11.jpg>)

обусловленных природными или техногенными факторами и вызывающих ответную реакцию зданий и сооружений, проявляющуюся в смещении или деформации колеблющихся конструкций.

Теоретическая оценка уязвимости зданий и сооружений, связанная с их способностью противостоять сейсмическим воздействиям, основывается на моделях поведения строительных объектов при этих воздействиях. Физические и математические модели работы сооружения во время землетрясения пока ещё в определённой мере имеют характер рабочих гипотез, подтверждением которых могут служить лишь результаты испытаний объектов, натурные обследования после землетрясений и инженерно-сейсмометрические наблюдения.

Методология изучения влияния сейсмических воздействий на строительные объекты предусматривает получение информации об их сейсмостойкости и опирается на следующие известные виды исследований: модельные лабораторные испытания, полигонные испытания, натурные инструментальные обследования эксплуатируемых объектов, обследования городской застройки после сильных землетрясений и инженерно-сейсмометрические наблюдения эксплуатируемых объектов в условиях природной и техногенной сейсмичности.

Модельные лабораторные испытания – это экспериментальные исследования, проводимые на моделях сооружений и их элементах небольшого размера, с различного рода механическими источниками возбуждения колебаний, моделирующими сейсмические воздействия, такими как вибромашины, вибростенды с гидроцилиндрами, многокомпонентные сейсмоплатформы с программным управлением (в основном иностранного производства) и др. (рис. 1).

Стенд позволяет обеспечить генерируемый диапазон частот – от 1 до 35 Гц – при максимальной (пиковой) амплитуде ускорения в горизонтальном направлении на базовой частоте 5 Гц – 8 м/с²; длительность воздействия (длительность каждой акселерограммы) – не менее 60 с; габаритные размеры грузового лотка – 8,0×3,0×3,8 м; максимальная масса полезной нагрузки – 300 т.

Недостатком таких исследований является то, что получаемые результаты в связи с отсутствием теории динамического подобия могут быть перенесены на реальные сооружения лишь с большими приближениями и служат, в основном, для разработки упрощённых моделей поведения сооружений при сейсмических воздействиях [3].

Более достоверные результаты для этих целей получают при полигонных испытаниях, которые проводят, как правило, на реальных сооружениях или крупномасштабных фрагментах сооружений с различными источниками, моделирующими сейсмические воздействия либо с помощью вибромашин, либо направленных взрывов. В СССР широко применялся сейсмозрывной метод линейно-рассредоточенных взрывов в скважинах с замедленным взрыванием между рядами при испытаниях строительных объектов на полигоне «Ляур» под

городом Душанбе, а также в 1986–1989 годах в Иркутской области. Позднее, в 1992 году в городе Ангарске при испытаниях фрагмента типового пятиэтажного жилого дома был использован способ траншейного подрыва плоских линейно-протяжённых зарядов при многорядном заложении и с замедлением взрыва по рядам [4].

Сейсмозрывные испытания в основном применяются для нового строительства, позволяют достичь реальных параметров сильных воздействий: ускорение колебаний порядка 0.4 g, а скорость колебаний 26 см/с, однако требуют длительных трудоёмких подготовительных мероприятий, отведения специальных территорий, обеспечения особых мер безопасности, привлечения специализированного персонала и др. Наиболее доступны исследования с использованием мощных передвижных вибромашин, устанавливаемых на реальных зданиях, например, при сдаче их в эксплуатацию (новое строительство) или, наоборот, на расселённых объектах (в период эксплуатации) либо перед их реконструкцией, либо демонтажем и сносом (рис. 2).

Однако при этом возникает сложная проблема моделирования достаточно мощных сейсмических воздействий, опасных для исследуемого сооружения. Получаемые результаты пока не обеспечивают необходимого приближения к реальным сейсмическим воздействиям, особенно на низких частотах, что важно для высотных зданий и сооружений и зданий, обладающих некоторыми системами активной сейсмозащиты [5].

Натурные инструментальные обследования эксплуатируемых объектов, проводимые в соответствии с СП 442.1325800.2019¹ позволяют оценить класс сейсмостойкости реальных сооружений и выявить их остаточный ресурс,

формируемый в результате воздействия естественных сейсмических нагрузок во время эксплуатации, в том числе после землетрясений. Обследования включают подготовку, предварительное (визуальное) и детальное (инструментальное) обследования с последующими камеральной обработкой и поверочными расчётами. При инструментальном обследовании применяют косвенные неразрушающие методы контроля прочности (ультразвуковые, ударного импульса, упругого отскока и т.д.) и прямые (отрыв, скалывание ребра и др.), с построением градуировочных зависимостей между косвенными характеристиками прочности и прочностью, определённой прямыми методами, а также при необходимости осуществляются отбор и лабораторные испытания образцов грунта и материалов конструкций фундамента, что обуславливает высокую трудоёмкость, стоимость и соответственно основные недостатки этих обследований. Например, в соответствии с МРР-3.6.02.19² для типового пятиэтажного четырёхсекционного жилого дома продолжительность составляет 7 чел.-мес. Получаемая информация отражает состояние объекта только на момент проведения обследований, фиксирует результат последствия реальных сейсмических нагрузок и может быть использована для создания прогностической модели разрушения однотипных сооружений городской застройки.

Обследования городской застройки после сильных землетрясений, осуществляемые в соответствии с СП 322.1325800.2017³, оценивают характер повреждений и разрушений строительных объектов, а также техническое состояние застройки города в целом после сильного землетрясения и служат как для объективной оценки силы землетрясения в соответствии с ГОСТ

¹ СП 442.1325800.2019 «Здания и сооружения в сейсмических районах. Оценка класса сейсмостойкости» (<https://docs.cntd.ru/document/554820828>).

² МРР-3.6.02.19 – Московские региональные рекомендации : Глава 3. Изыскательские работы : Сборник 3.6. Обследование и мониторинг технического состояния строительных конструкций и инженерного оборудования зданий и сооружений. – Москва, 2019. – 63 с. (<https://niac.mos.ru/standards/mrr/chapter-3/Сборник%203.6.%20МРР-3.6.02-19.pdf>).

³ СП 322.1325800.2017 «Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила обследования последствий землетрясений» (<https://docs.cntd.ru/document/556610329>).



Рис. 2. Испытание крупнопанельного девятиэтажного дома в Узбекистане с помощью вибромашин инерционного действия типа В-3, установленной на покрытии здания (источник: http://tvosibgtv.ru/events_geotechnics/vibrodinamicheskie-ispytaniya-9-ehnazhnogo-doma-v-uzbekistane.html)



Рис. 3. Общий вид разрушений жилой застройки. Город Нефтегорск. 1995 год (источник: https://earth-chronicles.ru/_nw/1048/08260115.jpg)

34511-2018⁴, так и для практической оценки модели прогноза последствий землетрясений для городской застройки (рис. 3).

Анализ получаемой обширной информации о характере повреждений строительных объектов и разрушений массовой застройки позволяет получить дополнительную информацию, способствующую развитию теории расчёта и методологии экспериментальных исследований для повышения надёжности конструкций и эффективных систем сейсмоусиления и сейсмозащиты. Вместе с тем возможность получения такой информации представляется сравнительно редко и, к сожалению, за это приходится расплачиваться несоизмеримыми потерями: последнее сильное землетрясение, произошедшее на Сахалине в 1995 году прошлого века, полностью разрушило пятиэтажную жилую застройку в городе Нефтегорске.

Инженерно-сейсмометрические наблюдения эксплуатируемых объектов – это инструментальные наблюдения с помощью измерительных приборов за поведением (колебаниями конструкций и прилегающего грунта) зданий и сооружений городской застройки в период эксплуатации при сейсмических нагрузках различной интенсивности, вызванных природной и техногенной сейсмичностью. Они позволяют по изменениям динамических параметров конструкций на ранней стадии выявить их опасные изменения и в реальном времени представить прогноз их остаточной сейсмостойкости для превентивных мероприятий по усилению и предотвращению перехода этих конструкций в ограниченно-работоспособное или аварийное состояние,

Следует отметить, что инженерно-сейсмометрическая информация также необходима для развития методологии экспериментальных исследований как для модельных лабораторных, так и полигонных испытаний, ибо только при её наличии можно правильно организовать такие испытания, то есть создать воздействия, действительно опасные для сооружения и обеспечивающие необходимый для испытаний уровень напряжений и деформаций в элементах конструкций, максимально приближенный к реальным природным воздействиям [6]. Вместе с тем инженерно-сейсмометрические наблюдения, являющиеся в прошлом самостоятельным направлением экспериментальных исследований, входят составной частью в современный цифровой мониторинг, включающий совокупность информационных ресурсов, позволяющих объективно оценивать сейсмостойкость эксплуатируемых объектов и управлять безопасностью массовой застройки на урбанизированных сейсмических территориях.

Инженерно-сейсмометрический мониторинг эксплуатируемых объектов

Начало инженерно-сейсмометрическим наблюдениям как процессу инструментального сбора информации о движении элементов сооружений и прилегающего грунта при seismic-

ческих воздействиях было положено работами японского учёного А. Имамура [7], проводившего в 1920 году инструментальные динамические измерения в здании во время его постройки. Результаты этих опытов были использованы Т. Сайда, Т. Танигути и К. Канаи для регистрации колебаний зданий при землетрясениях небольшой силы [8]. С 1927 года в Японии велись интенсивные работы по созданию аппаратуры для регистрации сильных землетрясений. Систематическая и целенаправленная регистрация поведения строительных конструкций при сильных землетрясениях начала проводиться в Японии с 1952 года, когда были сконструированы акселерографы сильных движений SMAC и DC [8].

Работа по регистрации сильных землетрясений в США были начаты Береговой и Геодезической службой в 1932 году в Южной Калифорнии [9]. Вслед за Японией и США создаются инженерно-сейсмометрические системы наблюдений в Мексике, Новой Зеландии, Чили, Индии, Румынии, Югославии и других странах [10].

В СССР первые приборы для регистрации колебаний зданий при землетрясениях были установлены в 50-е годы в городе Душанбе [11]. В последствии была образована сеть инженерно-сейсмометрической службы Госстроя СССР, насчитывающая к 1990 году 125 станций, оснащённых измерительными приборами аналогового типа и работающих в ждущем режиме. Они размещались в городах Петропавловске-Камчатском, Ялте, Улан-Удэ, Махачкала, Сочи и др., расположенных на сейсмических территориях. После распада СССР инженерно-сейсмометрическая служба, в том числе и её станции были ликвидированы, а полученная уникальная информация с записями динамических параметров конструкций объектов жилого фонда была полностью утрачена. Следует отметить, что эта служба постепенно восстанавливается в бывших союзных республиках, в частности, в Казахстане на базе института КазНИИСА.

Первичная информация о характере сейсмических воздействий на строительные объекты собирается инженерно-сейсмометрическими станциями (ИСС), установленными на зданиях городской застройки. Требования и правила проектирования ИСС регламентированы СП 330.1325800.2017⁵, согласно которым станция включает аппаратный комплекс измерительных приборов регистрации движения элементов здания или сооружения и участков прилегающего грунта при землетрясениях, объединяющий в единое целое сейсмометрическую аппаратуру (первичные преобразователи), установленную на элементах здания, а также на грунте вблизи этого здания, аппаратуру и оборудование обрабатывающего центра, каналы связи и другую аппаратуру (при необходимости). Основными измерительными элементами станции являются сейсмометры и акселерометры, регистрирующие синхронно во времени колебания конструкций и грунта [12].

⁴ ГОСТ 34511-2018 «Землетрясения. Макросейсмическая шкала интенсивности» (<http://vsegest.com/Catalog/70/70853.shtml>).

⁵ СП 330.1325800.2017 «Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования инженерно-сейсмометрических станций» (<https://docs.cntd.ru/document/556793893>).

Соответственно современные цифровые инженерно-сейсмометрические станции (ЦИСС) включают следующие средства измерения, прошедшие государственную регистрацию:

цифровые трёхкоординатные акселерометры: измерители низкочастотных сейсмических колебаний ИНСК (свидетельство № RU.C.28.004.-A.65548, диапазон измерения ускорения – от 2×10^{-4} до 14 м/с^2 , диапазон рабочих частот – от 0,5 до 100 Гц, диапазон рабочих температур – от -10 до $+45 \text{ }^\circ\text{C}$) и акселерометры ЦТА-СМ (свидетельство № RU.C.28.004.A.39928, диапазон измерения ускорения – от 2×10^{-5} до $1,0 \text{ м/с}^2$, диапазон рабочих частот – от 0,1 до 100 Гц, диапазон рабочих температур – от 5 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$);

цифровые трёхкоординатные сейсмометры ПРДП-СМ и ПРДП-СМ-1 (соответственно свидетельства № RU.C.28.004.A.39927, №RU.C.28.004.A.39926, технические параметры приведены для ПРДП-СМ-1: частотный диапазон измерения смещений при неравномерности амплитудно-частотной характеристики на уровне 3 дБ: от 1,0 до 50 Гц, минимальная измеряемая амплитуда смещений в функции частоты входного сигнала F_o/F_w , где $F_o = 1 \text{ Гц} - (1+F_o/F_w) \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, максимальная измеряемая амплитуда смещений в функции частоты входного сигнала F_o/F_w , где $F_o = 1 \text{ Гц} - (F_o/F_w) \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, диапазон рабочих температур – от 5 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$);

цифровые двухкоординатные наклонометры ЦНД-СМ (свидетельство № RU.C.27.195.A.64525, диапазон измерений угла наклона $\pm 720''$, диапазон рабочих частот – от 0,1 до 100 Гц, диапазон рабочих температур – от 5 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$). Поскольку вычислительная процедура преобразования ускорений в смещения и обратно некорректна и требует дополнительной

информации [13], то на станциях для контроля такого преобразования регистрируются часто как ускорения (акселерометрами), так и смещения (сейсмометрами). Внешний вид основных измерительных приборов представлен на рисунке 4.

Эти приборы устанавливаются на несущих конструкциях сооружений в соответствии с особенностями их конструктивных схем и задачами исследований (рис. 5). При этом принцип их размещения должен обеспечивать возможность получения информации для задаваемого типа динамических задач.

Например, размещение измерительного пункта на деревометаллической ферме покрытия Крытого конькобежного центра в Крылатском (Москва) [14], осуществлялось из условия получения максимального произведения смещений по используемым пяти обертонам колебаний этой конструкции, частоты которых в зависимости от степени её повреждения менялись от 1 до 46%. В этой точке регистрируются все пять тонов, что соответствует оптимальному соотношению «сигнал–шум», позволяющему надёжно контролировать изменение частот собственных колебаний фермы.

Для функционирования ЦИСС разработаны программное обеспечение «Высота – М» (свидетельство о гос. регистрации программы №2014660741) и информационная модель объекта «Динамическая цифровая информационная модель» (свидетельство о гос. регистрации программы №2021611677). За счёт быстродействия измерительных и вычислительных операций многократно сокращаются время и затраты по оценке реальной сейсмостойкости строительных объектов. Отечественные измерительные средства в два-три раза дешевле зарубежных аналогов.

Современные ЦИСС, производя регистрацию колебаний различных элементов строительных конструкций и прилегающего грунта, обеспечивают информацией широкий круг задач сейсмостойкого строительства и безопасной эксплуатации объектов на сейсмических территориях.

Прежде всего инженерно-сейсмометрическая информация позволяет выявить резервы несущей способности сооружений. Методы расчёта сооружений на сейсмостойкость в силу ограниченности знаний об особенностях реальной работы конструкций при сейсмических воздействиях являются приближёнными, поэтому расчётные параметры, как правило, отличаются от результатов инженерно-сейсмометрических наблюдений. По характеру разности между наблюдаемыми



а) цифровой трёхкоординатный акселерометр ИНСК (измеритель низкочастотных сейсмических колебаний); б) цифровой трёхкоординатный сейсмометр ПРДП-СМ; в) цифровой двухкоординатный наклонометр ЦНД-СМ



а) общая схема расстановки; б) общий вид измерительного пункта с акселерометрами ЦТА-СМ на конструкциях покрытия; в) размещение регистрирующих приборов в измерительном пункте

величинами и предсказываемыми расчётом можно судить о необходимости проведения мероприятий по сейсмоусилению или о возможности снижения уровня таких мероприятий для обеспечения заданной несущей способности сооружения. В первом случае обеспечивается необходимый уровень надёжности конструкций, во втором – обнаруживаются возможности по экономии применяемых ресурсов.

Наравне с этим инженерно-сейсмометрические данные позволяют также совершенствовать и сами методы расчёта, обеспечивая возможность учёта большего количества факторов, определяющих работу конструкций с изменением структуры динамической модели сооружения и получать эмпирические подтверждения значений параметров и их зависимостей, которые в расчётах принимались гипотетически на основе прежней динамической модели.

Кроме того инженерно-сейсмометрическая информация важна для совершенствования и создания принципиально новых конструктивных решений. Действительно, если установлено исчерпание резерва несущей способности сооружения и по полученной инженерно-сейсмометрической информации выявлены его конструктивные элементы, работающие на пределе своих возможностей и в основном определяющие несущую способность объекта в целом, то на базе этой информации возможно изменить конструктивные элементы или разработать принципиально новые конструкции, которые будут работать в более облегчённых силовых условиях за счёт перераспределения нагрузки на другие недостаточно загруженные элементы. Таким образом, при том же расходе материалов за счёт совершенствования конструктивных решений, учитывающих перераспределение нагрузок, одновременно с повышением надёжности сооружения повышаются и его экономические показатели.

Особо важное значение инженерно-сейсмометрический мониторинг имеет для обеспечения безопасной эксплуата-

ции строительных объектов массовой городской застройки. Постоянно получаемая инженерно-сейсмометрическая информация о динамических параметрах объекта при слабых и средних землетрясениях позволяет выявить на ранней стадии их изменения, характеризующие, как отмечалось, опасные структурные изменения в материалах и конструкциях и ведущие к снижению несущей способности сооружения в целом. Полученные результаты являются основой более глубокого экспериментального анализа конструкций, позволяющего своевременно устранить причины снижения несущей способности сооружений и предотвратить их переход в ограниченно-работоспособное или аварийное состояния, обеспечив тем самым безопасную эксплуатацию объектов застройки урбанизированных территорий и существенное сокращение рисков экономического ущерба.

Так как на станциях инженерно-сейсмометрических наблюдений проводится регистрация движения прилегающего к сооружению грунта, то эту информацию целесообразно совместить с инженерно-сейсмологической для изучения общих и региональных особенностей сейсмических воздействий, а также использовать в качестве реперных точек при проверке и корректировке карт сейсмомикрорайонирования застройки городов, где расположены ЦИСС [15]. Структурная схема целесообразного движения инженерно-сейсмометрической информации представлена на рисунке 6.

Построенные на основе инженерно-сейсмологических данных и инженерно-сейсмометрической информации математические модели общих и региональных сейсмических воздействий значительно эффективнее в расчётах сооружений на сейсмостойкость, если на основе инженерно-сейсмометрической информации удастся установить эмпирические параметры тех реализаций из этих моделей, которые наиболее опасны для того или иного типа сооружения.

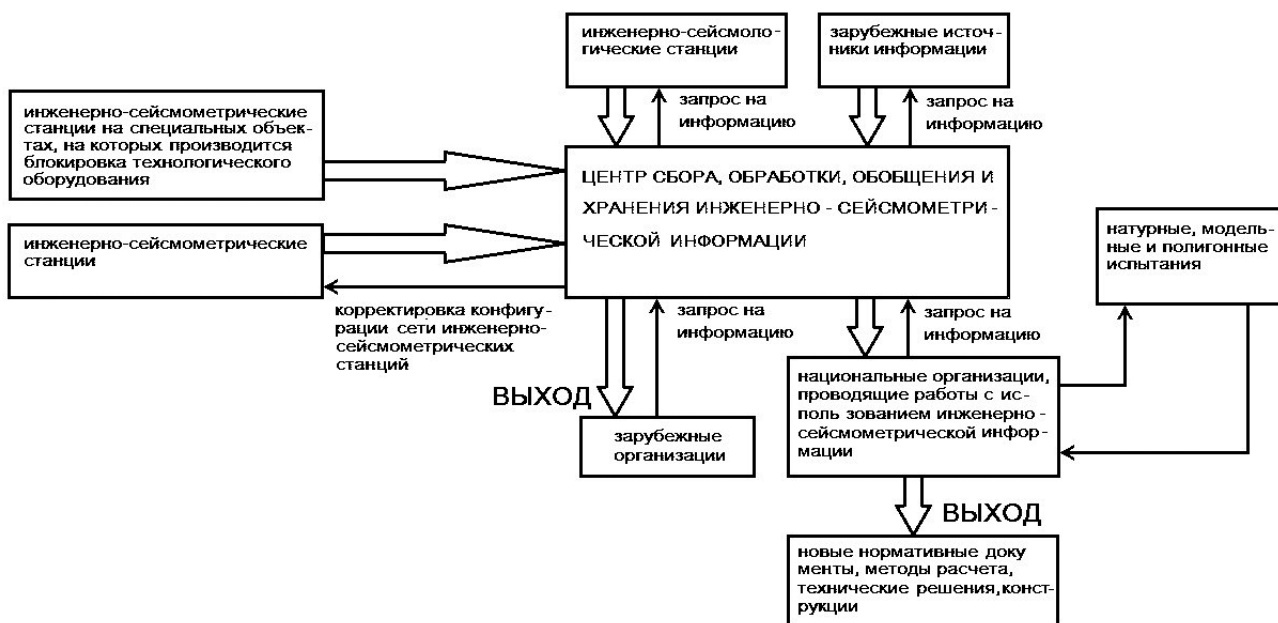


Рис. 6. Структурная схема движения инженерно-сейсмометрической информации

Обратные задачи для расчётных моделей сейсмостойкости строительных конструкций

Разработке расчётных моделей конструкций для сейсмических регионов посвящено достаточно много работ [16–18].

Задача определения динамических параметров сооружений относится к классу обратных задач, которые, как указано в [13], образуют один из подклассов некорректных задач. Такие задачи требуют специальных методов решения. Для случая теории сейсмостойкости подобные задачи сводятся к системам интегральных уравнений или алгебраическим линейным уравнениям.

Некорректность постановки обратных задач определяется в основном двумя факторами. Один из них относится к области теоретических исследований и связан с ограниченностью математической теории, описывающей данное явление, другой – с получением ограниченного ряда экспериментальных данных и погрешностями измерений. Задача нахождения приближённого решения некорректно поставленной задачи является практически неоднозначной. Решение обратной задачи, сводящейся к получению и исследованию всей области решений с использованием метода Монте-Карло, является корректной задачей.

В качестве примера рассмотрим постановку задач, касающихся непосредственного эмпирического определения параметров динамических моделей сооружений на основе инженерно-сейсмометрической информации.

Для динамических моделей сооружений, представляющих собой консольные стержни с сосредоточенными массами, жёстко заделанные в основании, в предположении, что сооружение работает упруго, то есть справедлив принцип суперпозиции и система обладает вязким затуханием, уравнение движения системы имеет вид:

$$[m]\ddot{\vec{y}}(t) + [c]\dot{\vec{y}}(t) + [k]\vec{y}(t) = \vec{P}(t),$$

где $[m]$ – матрица масс, $[c]$ – матрица затухания, $[k]$ – матрица жёсткостей сооружения, $\vec{y}(t)$, $\dot{\vec{y}}(t)$, $\ddot{\vec{y}}(t)$ – векторы соответственно смещения, скорости и ускорения многомассовой системы, $\vec{P}(t)$ – внешняя возбуждающая сила.

Обратная задача в этом случае сводится к поиску элементов матриц $[m]$, $[c]$, $[k]$ по экспериментально зарегистриро-

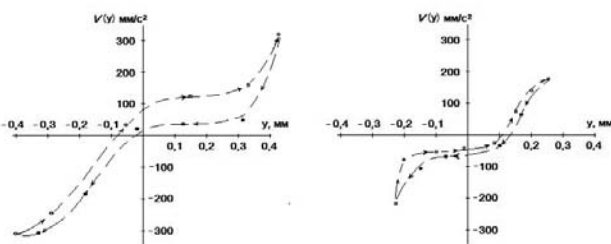
ванным данным во время землетрясения на инженерно-сейсмометрической станции: $\vec{y}(t)$, $\dot{\vec{y}}(t)$, $\ddot{\vec{y}}(t)$, $\vec{P}(t)$.

Одним из важных разделов изучения реальной работы строительных конструкций во время землетрясений является изучение нелинейного поведения зданий и сооружений при сейсмических воздействиях на основе решения обратных задач [19]. На рисунках 7 и 8 представлены примеры эмпирических динамических параметров моделей реальных зданий, полученные на основе анализа информации ИСС советского периода. Циклы последовательного нагружения и разгрузки динамической модели в виде одномассового осциллятора, жёстко закреплённого в основании, для шестизэтажного каменного жилого здания в городе Ереване при землетрясении, произошедшем 25 февраля 1978 года, представлены на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены графики зависимости эффективного периода собственных колебаний T этого здания и его коэффициента затухания ε от интенсивности сейсмического воздействия.

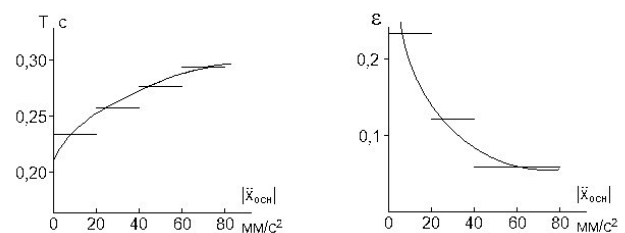
Анализ эмпирически полученных результатов циклов нагружения и разгрузки, аналогичных представленным на рисунке 7, позволяет разработать модель нелинейной работы конструкций конкретных строительных объектов с последующим использованием их в расчётах на сейсмостойкость. Из рисунка 8 видно, что эффективные динамические параметры здания экспоненциально изменяются до определённой величины (для периода порядка 40%) в зависимости от уровня сейсмического воздействия, что необходимо учитывать как при расчётах таких зданий, так и при выборе для расчётов наиболее опасных сейсмических воздействий.

Таким образом, успешное развитие математических методов решения обратных задач и, в частности, методов идентификации динамических систем [20] позволяет по-новому подойти к проблеме применения информации ЦИСС для изучения динамических параметров строительных конструкций [21]. Эти методы открывают широкие возможности существенно более эффективного использования данных ЦИСС, позволяют получать эмпирические закономерности тех физических процессов, которые положены в основу динами-



стрелками указано направление процесса: y – смещение основания, $V(y)$ – восстанавливающая сила, отнесённая к массе осциллятора

Рис. 7. Циклы $v(y)$, охватывающие последовательно процесс нагружения и разгрузки



$\ddot{x}_{очн}$ – ускорение основания

Рис. 8. Графики зависимости эффективного периода собственных колебаний T каменного здания в городе Ереване и его коэффициента затухания ε от интенсивности сейсмического воздействия

ческих моделей сооружений, с целью большего уточнения физической модели работы конструкций при землетрясении.

Перспективы развития инженерно-сейсмометрического мониторинга застройки урбанизированных территорий на современном этапе

Для принятия обоснованных решений по обеспечению необходимой безопасности городской застройки за счёт превентивных мероприятий по усилению зданий и сооружений, а также для эффективного предотвращения последствий землетрясений необходим надёжный прогноз, опирающийся на опыт и анализ статистических данных о характере произошедших сильных землетрясений и их последствиях как в нашей стране, так и других государствах мира.

Однако статистика, основанная только на характере разрушений, не даёт надёжного результата, поскольку реальные последствия каждого землетрясения сильно связаны с достаточно большим количеством разнородных факторов, например, таких как ускорения грунта на различных частотах, длительность сейсмического сигнала, геологические условия и условия рельефа территории города, реальная сейсмостойкость объектов и тип застройки города и др. Поэтому данная статистика достаточно условна, так как базируется на их усреднении. Более надёжная статистическая информация повреждаемости зданий и сооружений при землетрясениях заложена в макросейсмической шкале интенсивности землетрясений (в России применяется шкала MSK-64), однако она основана на качественном анализе старой застройки, представленной преимущественно несейсмостойкими зданиями и поэтому мало пригодна для прогноза последствий сильных землетрясений современных городов. В этой связи мировая практика переходит на инструментальную оценку интенсивности землетрясений.

При прогнозе последствий землетрясений часто важно иметь карту возможных разрушений зданий и сооружений существующей застройки города при той или иной реализации прогнозируемого сейсмического воздействия, которая определяется сейсмической опасностью и уязвимостью зданий и сооружений. Практическое определение прогнозируемой сейсмической опасности и уязвимости сооружений имеет несколько приближений (в зависимости от используемых для прогноза исходных данных – ОСР, ДСР и/или МСР), в связи с чем прогноз последствий разрушительных землетрясений может осуществляться лишь с той степенью достоверности, информация о сейсмической опасности и уязвимости сооружений которой имеется для данного населенного пункта [22].

Реальная сейсмостойкость может различаться для разных типов зданий и сооружений, поэтому прогноз последствий землетрясений следует делать не только в отношении сейсмичности территории данного населенного пункта по карте общего сейсмического районирования, но и для землетрясений меньшей интенсивности, а также для сильных динамических воздействий техногенного характера и наведённой сейсмичности.

Для снижения уровня неопределённости при оценке уязвимости зданий и сооружений необходимо развивать исследования в области неупругой работы сооружений с использованием волновой концепции разрушений с учётом пространственной работы конструкций во взаимодействии с основанием здания во время землетрясения. При этом большое значение имеет накопление и статистическая обработка как экспериментальных результатов испытаний по данным направлениям, так и анализ резервов несущей способности эксплуатируемых зданий и сооружений на сейсмических территориях по результатам инженерно-сейсмометрических наблюдений.

Учитывая большой объём мониторинговых данных по обработке, хранению и их передаче, задача прогноза последствий разрушительных землетрясений может быть эффективно решена только с использованием современных цифровых технологий в рамках развития концепции квантовых коммуникаций на основе создания цифровых автоматизированных систем контроля и прогноза изменения сейсмостойкости объектов, расположенных на урбанизированных сейсмических территориях. Подобная система может представлять собой внутренне связанные совокупности разномасштабных электронных карт застройки города с информацией о реальной сейсмостойкости каждого здания и сооружения и аналогичных карт с информацией о сейсмической опасности различных районов (территорий) этого города с вычислительной программой, реализующей алгоритм определения степени опасности разрушения объектов при различных сценариях реализации сейсмического воздействия природного или техногенного характера.

Другими словами, вычислительная программа должна выполнять следующие функции: 1) сопоставлять элементы множества зданий и сооружений в зависимости от их месторасположения в городе с элементами множества, определяющего сейсмическую опасность для различных районов города; 2) по определённой процедуре сравнивать заданные атрибуты элементов этих множеств и 3) по определённому алгоритму делать выводы о прогнозируемом состоянии здания или сооружения после того или иного потенциально реализуемого сейсмического воздействия.

Надёжность мониторинговой информации о состоянии огромного массива эксплуатируемых объектов на урбанизированных территориях связана в том числе с особенностями расположения ЦИСС на зданиях городской застройки, поэтому одним из важнейших аспектов развития системы инженерно-сейсмометрических наблюдений является проблема построения оптимальной сети ЦИСС [23].

Вероятность P получения инженерно-сейсмометрической информации заданной структуры, определяемой задачами, для решения которых она собирается, на конкретной станции ЦИСС, выражается формулой:

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3,$$

здесь P_1 – вероятность осуществления регистрируемого события (землетрясения заданной интенсивности), P_2 – вероятность

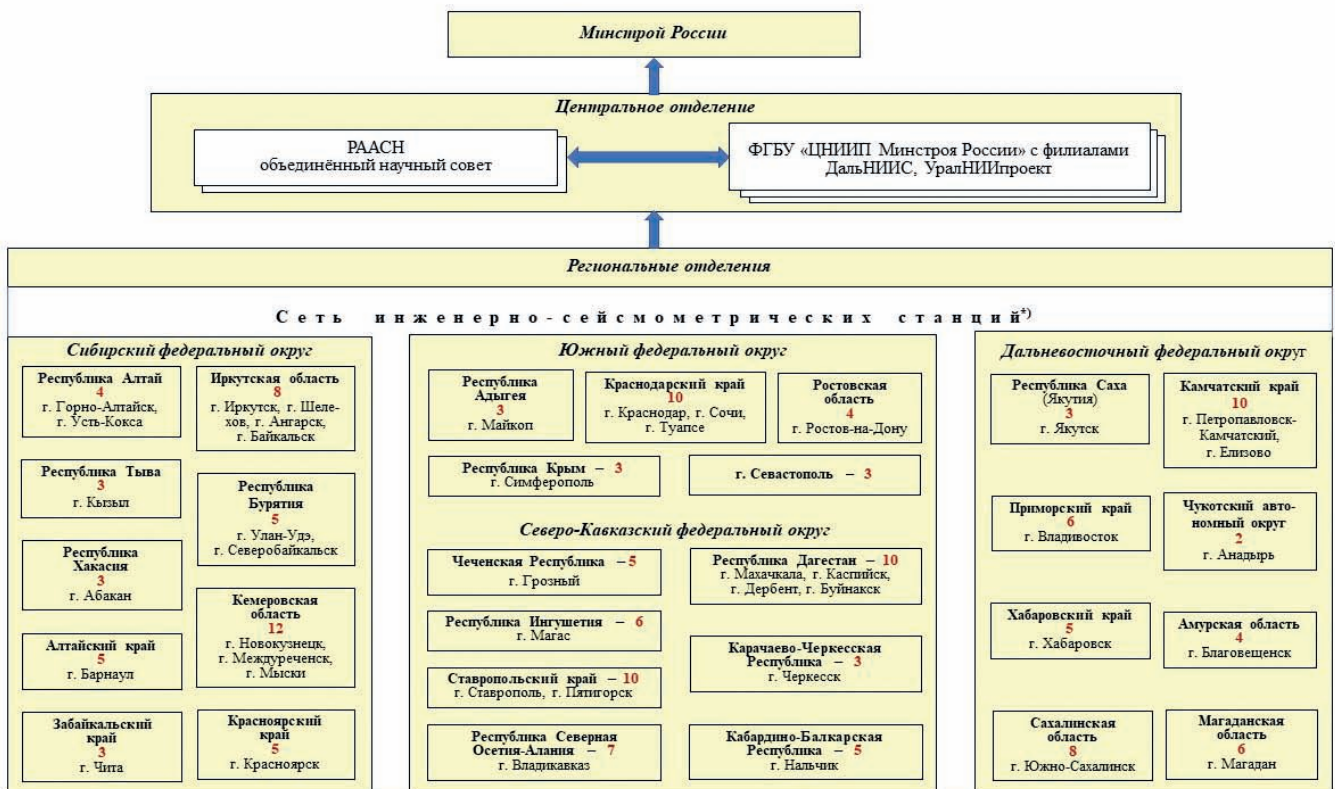
регистрации события в случае, если оно происходит (определяется надёжностью работы аппаратуры и способа регистрации), P_3 – вероятность обеспечения необходимой структуры информации (определяется возможностью расположения измерительных пунктов в необходимых местах сооружения для получения информации заданной структуры). Аналогичная формула применима и для всей сети в целом, где вероятности относятся уже к сети станций, а не к отдельной станции. В этом случае задача повышения эффективности работы сети инженерно-сейсмометрических станций за счёт наилучшего выбора мест их расположения определяется увеличением вероятности P_1 . Интуитивно ясно, что инженерно-сейсмометрические станции надо располагать там, где чаще происходят землетрясения. Однако этот вопрос не так прост, как может показаться, если учесть большое число станций и ограничения на материальные, трудовые, организационные возможности, необходимость учёта некоторых других факторов, в частности, особенностей сейсмических воздействий, различных механизмов их реализации, типологии объектов и т.д.

Увеличение вероятности P_1 не ограничивается лишь оптимальным расположением инженерно-сейсмометрических станций, так как это возможно и за счёт создания временных мобильных станций на сооружениях, находящихся в местах, где только что произошло сильное землетрясение, поскольку вероятность возникновения землетрясений-афтершоков, или

повторных толчков, как правило, значительно повышается. Однако в этом случае, как показал опыт эксплуатации станций, существенно понижается вероятность P_3 обеспечения необходимой структуры получаемой инженерно-сейсмометрической информации, что связано со сложностями расположения аппаратуры на эксплуатируемых сооружениях.

Кроме того, должны быть исключены помехи в процессе измерений, обеспечен беспрепятственный доступ к контролю и обслуживанию измерительной аппаратуры и др. особенно на объектах жилого фонда и социальной инфраструктуры, поэтому ЦИСС должны входить в структуру уполномоченных органов субъектов Российской Федерации, например, местных жилищных инспекций.

Таким образом, эффективное повышение безопасности гражданских объектов на урбанизированных территориях с особыми природными и техногенными условиями с учётом вышеизложенных соображений возможно только при организации единой цифровой системы эксплуатационного инженерно-сейсмометрического мониторинга (ЕЦСЭМ), позволяющей осуществлять сбор, обработку, хранение и передачу мониторинговой информации, контролировать предельный ресурс конструкций, формировать надёжный прогноз его изменения и обеспечивать оперативной информацией о техническом состоянии массовой застройки государственные органы страны.



^{*)}количество станций уточняется по данным микросейсмического районирования, с учётом объёмов и типологии объектов. Предложение авторов статьи

Рис. 9. Организационная структура Единой цифровой системы эксплуатационного инженерно-сейсмометрического мониторинга гражданских объектов на сейсмических территориях

В качестве инструментально-технологической основы для этой системы целесообразно использовать универсальную цифровую технологию оценки и контроля механической безопасности зданий и сооружений, апробированную на уникальных объектах, расположенных на сейсмических территориях [2], и отмеченную распоряжением Правительства Российской Федерации от 26.10.2022 г. № 3179 (п. 13). Учитывая полномочия Минстроя РФ (Постановление Правительства Российской Федерации от 18.11.2013 №1038 (ред. от 28.06.2023 г.), п.п. 5.4.29 и 5.4.37) по осуществлению мониторинга состояния и обеспечению сохранности объектов жилищной сферы, разработка и управление данной системой как инструмента контроля их безопасности должно быть возложено на профильные государственные учреждения министерства и регионов. В современных условиях – на ФГБУ РААСН, ФГБУ ЦНИИП Минстроя РФ и уполномоченные органы субъектов РФ. Соответственно основными структурными элементами системы, обеспечивающими их функциональную взаимосвязь, являются центральное отделение, включающее экспертно-методологический центр на базе объединённого научного совета РААСН и РАН и научно-испытательного центра ЦНИИП Минстроя России, а также уполномоченные региональные отделения субъектов РФ с сетью ЦИСС, расположенные на сейсмических территориях (рис. 9).

Экспертно-методологический центр осуществляет общую координацию ЕЦСЭМ, проводит анализ и экспертизу мониторинговой информации и на её основе готовит заключения о перспективных направлениях развития фундаментальных и прикладных научных исследований в области методологии эксплуатационной безопасности и обеспечения сохранности объектов жилищной сферы, а также совершенствования расчётных методов проектирования, экспериментальных исследований и нормирования сейсмостойкости строительных объектов на урбанизированных территориях с природной и техногенной сейсмичностью.

Научно-испытательный центр проводит обработку поступающей информации и формирует банк динамических параметров эксплуатируемых объектов; определяет опасные их изменения и разрабатывает прогностические карты безопасности городской застройки на урбанизированных территориях для передачи в федеральные и региональные органы исполнительной власти, а также проводит исследования по разработке инновационных технологий восстановления, сейсмозащиты и категорирования объектов с учётом дефицита сейсмостойкости; разрабатывает цифровые паспорта и регламенты эксплуатационной безопасности объектов; разрабатывает типовые проекты региональных ЦИСС, измерительное оборудование и программное обеспечение, организует их поставку, монтаж и ввод в эксплуатацию, обеспечивает обучение персонала, контроль и поддержку надёжности работы региональных ЦИСС.

Региональные отделения обеспечивают функционирование ЦИСС, сбор и обработку первичной информации, хранение и передачу её в центральное отделение и региональные уполномоченные органы.

Практическую реализацию ЕЦСЭМ целесообразно начать с разработки, как уже предлагалось в [2], одного-двух пилотных проектов для конкретных регионов с повышенной сейсмичностью, например, в Северо-Кавказском и Дальневосточном федеральных округах с целью отработки функционирования ЦИСС на различных административно-территориальных уровнях, уточнения сметных нормативов восстановления и капитального ремонта объектов без отселения с учётом монтажа ЦИСС и использования сейсмоизолирующих систем, накопления опыта и последующего тиражирования в остальных субъектах с формированием в дальнейшем Национальной службы инженерно-сейсмометрического мониторинга Минстроя России.

Заключение

В рамках цифровой трансформации строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, в развитие концепции квантовых коммуникаций по обработке и передаче большого объёма данных предложена структура и практическая реализация единой цифровой системы эксплуатационного инженерно-сейсмометрического мониторинга объектов жилищной сферы, представляющих главную угрозу при землетрясениях на урбанизированных территориях. Эта система позволит не только восстановить наблюдения с осуществлением контроля за состоянием зданий и сооружений на современном технологическом уровне, но главным образом предоставит возможность управления механической безопасностью и обеспечит сохранность массовых объектов жилого фонда и социальной инфраструктуры на данных территориях.

Формируемая мониторинговая информация ЦИСС является постоянным актуальным источником, позволяющим определять приоритетные направления фундаментальных и прикладных научных исследований в области теории сейсмостойкости строительных объектов; совершенствования методов проектирования, обеспечивающих сочетание высокой сейсмостойкости конструкций и экономичности технических решений, развития научных основ методологии экспериментальных исследований; создание индустриальных технологий восстановления (капитального ремонта) и обеспечения сохранности объектов жилищной сферы, минимизирующих возможные риски и обеспечивающих безопасность градостроительного развития сейсмических урбанизированных территорий Российской Федерации.

Список источников

1. Сейсмологический бюллетень / Текст : непосредственный. – Обнинск : ОМЭ (ИФЗ АН СССР), 1980–1984.
2. О критериях дефицита сейсмостойкости при эксплуатации объектов жилищного фонда на сейсмически активных территориях / В.В. Гурьев, В.М. Дорофеев, Р.Т. Акбиев, В.И. Булыкин. – Текст : непосредственный // Жилищное строительство. – 2023. – № 3. – С. 50–61.
3. Модели сейсмостойкости сооружений / И.И. Гольденблат, Н.А. Николаенко, С.В. Поляков, С.В. Ульянов. – Москва : Наука, 1979. – 294 с. – Текст : непосредственный.

4. Оценка повреждаемости зданий и сооружений по результатам сейсмозрывных и вибрационных испытаний опытных объектов / Ю.А. Бержинский, В.А. Павленов, А.П. Ордынская, Л.П. Попова. – Текст : непосредственный // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века : Сборник научных трудов. – Новосибирск : Наука, 1996. – С. 194–199.

5. Курзанов, А.М. Натурные вибрационные исследования сил затухания сооружений в линейно-упругой стадии работы / А.М. Курзанов. – Текст : непосредственный // Исследования сейсмостойкости сооружений и вопросы совершенствования инженерно-сейсмометрической службы : Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – Москва : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1985. – С. 54–64.

6. Задачи и пути повышения эффективности инженерно-сейсмометрической службы страны / Б.Е. Денисов, В.М. Дорофеев, С.Х. Негматуллаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Промышленное строительство, 1982. – № 9. – С. 3–6.

7. Housner, G.W. Earthquake Engineering – Some Early History / G.W. Housner. – Текст : непосредственный // Proc. of the Golden Anniversary Workshop on Strong Motion Seismometry. – California, Los Angeles : Department of Civil Engineering, University of Southern California, 1983, pp. 7–16.

8. Dynamic Behavior of Earth Dams During Earthquakes / S. Okamoto, C. Tamura, K. Kato, H. Otawa. – Текст : непосредственный // Proc. of Japan Earthquake Engineering Symposium. – Tokyo, 1966.

9. Observed Vibration of a Nuclear Reactor Building During Some Weak Earthquakes / H. Tajani, M. Ohmura, T. Ushida, K. Akino. – Текст : непосредственный // Proc. of 3d World Conf. on Earthquakeeng. – 1965.

10. Сейсмостойкие сооружения за рубежом / под. ред. В.Н. Насонова. – Москва : Стройиздат, 1968. – 223 с. – Текст : непосредственный.

11. Инженерно-сейсмометрическая служба г. Душанбе за 1967–70 гг. – Душанбе : ДОНИШ, 1971. – 74 с. – Текст : непосредственный.

12. Способ многоканальной регистрации сейсмических колебаний на инженерно-сейсмометрической станции : Патент РФ на изобретение № 2654831 / Гурьев В.В., Дорофеев В.М., Лысов Д.А., Денисов А.С., Катренко В.Г. – Зарегистрировано 23.06.2017 г. – Текст : непосредственный.

13. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. – Москва : Наука, 1974. – 224 с. – Текст : непосредственный.

14. Дорофеев, В.М. К вопросу о контроле технического состояния ферм крытого конькобежного центра в Кырлатском / В.М. Дорофеев, Д.А. Лысов, Е.П. Хайнер. – Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 11. – С. 23–26.

15. Statistical Nonstationary Model of Seismic Effects for Earthquake-Resistant Design of structures / V.M. Dorofeyev, L.N. Dorofeyeva, V.A. Pshenichnova, S.A. Mamaev. – Текст : непо-

средственный // Proc. 10th European Conf. on Earthquakeeng. – Vol. 1– Austria, Viena, 1994. – P. 291–296.

16. Поляков, С.В. Последствия сильных землетрясений / С.В. Поляков. – Москва : Стройиздат, 1978. – 311 с. – Текст : непосредственный.

17. Корчинский, И.Л. Кардинальные вопросы сейсмостойкого строительства / И.Л. Корчинский, Т.Ж. Жунусов. – Алма-Ата : КазЦНТИС Госстроя Каз. ССР, 1988. – 131 с. – Текст : непосредственный.

18. Назаров, Ю.П. Аналитические основы расчёта сооружений на сейсмические воздействия / Ю.П. Назаров. – Москва : Наука, 2010. – 467 с. – Текст : непосредственный.

19. Кириков, Б.А. Исследование статистическим методом одномассовой нелинейной системы / Б.А. Кириков, В.М. Дорофеев. – Текст : непосредственный // Строительство и архитектура. Сейсмостойкое строительство. Серия 14. – 1979. – Вып. 8. – С. 31–35.

20. Дейч, А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М. Дейч. – Москва : Энергия, 1979. – 240 с. – Текст : непосредственный.

21. Дорофеев, В.М. Информация инженерно-сейсмометрической службы о нелинейном поведении сооружений / В.М. Дорофеев, Б.Е. Денисов. – Текст : непосредственный // Сейсмостойкое строительство. – 1982. – Серия 14, вып. 9. – С. 19–22.

22. Дорофеев, В.М. Прогноз последствий сильных землетрясений / В.М. Дорофеев, А.С. Денисов. – Текст : непосредственный // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2019. – № 1 (38). – С. 28–31.

23. Дорофеев, В.М. Математическая задача оптимизации сети станций инженерно-сейсмометрической службы страны / Дорофеев В.М. // Исследования по теории сейсмостойкости сооружений. – Москва : ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1983. – С. 91–104. – Текст : непосредственный.

References

1. Seismologicheskii byulleten' [Seismological Bulletin]. Obninsk, OME (IFZ AN SSSR), 1980–1984. (In Russ.)

2. Guryev V.V., Dorofeev V.M., Akbiev R.T., Bulykin V.I. O kriteriyakh defitsita seismostoikosti pri ekspluatatsii ob"ektov zhilishchnogo fonda na seismicheski aktivnykh territoriyakh [On the Criteria for the Deficiency of Seismic Resistance during the Operation of Housing Facilities in Seismically Active Territories]. In: *Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing construction]*, 2023, no. 3, pp. 50–61. (In Russ., abstr. in Engl.)

3. Goldenblat I.I., Nikolaenko N.A., Polyakov S.V., Ulyanov S.V. Modeli seimostoikosti sooruzhenii [Models of Seismic Resistance of Structures]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 294 p. (In Russ.)

4. Berzhinskii Yu.A., Pavlenov V.A., Ordynskaya A.P., Popova L.P. Otsenka povrezhdaemosti zdaniy i sooruzhenii po rezul'tatam seismovzryvnykh i vibratsionnykh ispytaniy opytnykh ob"ektov [Assessment of Damage to Buildings and Structures Based on the Results of Seismic and Vibration Tests

- of Experimental Objects]. In: *Geofizicheskie issledovaniya v Vostochnoi Sibiri na rubezhe XXI veka* [Geophysical Research in Eastern Siberia at the Turn of the XXI Century], Collection of scientific works. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996, pp. 194–199. (In Russ.)
5. Kurzanov A.M. Naturnye vibratsionnye issledovaniya sil zatukhaniya sooruzhenii vlineino-uprugoi stadii raboty [Full-Scale Vibration Studies of Damping Forces of Structures in the Linear Elastic Stage of Work]. In: *Issledovaniya seismostoikosti sooruzhenii i voprosy sovershenstvovaniya inzhenerno-seismometricheskoi sluzhby* [Studies of Seismic Structures and Issues of Improving the Engineering and Seismometric Service], Proceedings of the V.A. Kucherenko TSNIISK. Moscow, V.A. Kucherenko TSNIISK. 1985. pp. 54–64. (In Russ.)
6. Denisov B.E., Dorofeev V.M., Negmatullaev S.H., Vypryazhkin Yu.A., Khachiyan E.E. Zadachi i puti povysheniya effektivnosti inzhenerno-seismo-metricheskoi sluzhby strany [Tasks and Ways to Improve the Efficiency of the Engineering-Seismic-Metric Service of the Country]. In: *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial Construction], 1982, no. 9, pp. 3–6. (In Russ.)
7. Housner G.W. Earthquake Engineering – Some Early History. In: *Proc. of the Golden Anniversary Workshop on Strong Motion Seismometry*. California, Los Angeles. Department of Civil Engineering, University of Southern California, 1983, pp. 7–16. (In Engl.)
8. Okomoto S., Tamura C., Kato K., Otawa H. Dynamic Behavior of Earth Dams During Earthquakes. In: *Proc. of Japan Earthquake Engineering Symposium*. Tokyo. 1966. (In Engl.)
9. Tajani H., Ohmura M., Ushida T., Akino K. Observed Vibration of a Nuclear Reactor Building During Some Weak Earthquakes/ In: *Proc. of 3d World Conf. on Earthquakeeng*, 1965. (In Engl.)
10. Nasonov V.N. (ed.). Seismostoikie sooruzheniya za rubezhom [Earthquake-Resistant Structures Abroad]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1968, 223 p. (In Russ.)
11. Inzhenerno-seismometricheskaya sluzhba g. Dushanbe za 1967–70 gg. [Engineering Seismometric Service of Dushanbe for 1967–70]. Dushanbe. DONISH Publ, 1971, 74 p. (In Russ.)
12. Guryev V.V., Dorofeev V.M., Lysov D.A., Denisov A.S., Katrenko V.G. Sposob mnogokanal'noi registratsii seismicheskikh kolebaniy na inzhenerno-seismometricheskoi stantsii [Method of Multichannel Registration of Seismic Vibrations at an Engineering Seismometric Station], Patent RF no. 2654831, Registered 06/23/2017. (In Russ.)
13. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods of Solving Incorrect Problems]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 224 p. (In Russ.)
14. Dorofeev V.M., Lysov D.A., Hainer E.P. K voprosu o kontrole tekhnicheskogo sostoyaniya ferm krytogo kon'kobezhnogo tsentra v Krylatskom [Concerning the Control of Technical Condition of Trusses of the Covered Skating Centre in Krylatskoye]. In: *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2009, no. 11, pp. 23–26. (In Russ., abstr. in Engl.)
15. Dorofeyev V.M., Dorofeyeva L.N., Pshenichnova V.A., Mamaev S.A. Statistical nonstationary model of seismic effects for earthquake-resistant design of structures [Statistical Nonstationary Model of Seismic Effects for Earthquake-Resistant Design of Structures]. In: *Proc. 10th European Conf. on Earthquakeeng*. Austria, Viena, 1994, Vol 1, pp. 291–296. (In Engl.)
16. Polyakov S.V. Posledstviya sil'nykh zemletryasenii [Consequences of strong earthquakes. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 311 p. (In Russ.)
17. Korchinsky I.L., Zhunusov T.J. Kardinal'nye voprosy seismostoikogo stroitel'stva [Cardinal Issues of Earthquake-Resistant Construction]. Alma-Ata KazTsNTIS Gosstroy Kaz. SSR, 1988, 131 p. (In Russ.)
18. Nazarov Yu.P. Analiticheskie osnovy rascheta sooruzhenii na seismicheskie vozdeistviya [Analytical Bases for Calculating Structures for Seismic Impacts]. Moscow, Nauka Publ., 2010, 467 p. (In Russ.)
19. Kirikov B.A., Dorofeev V.M. Issledovanie statisticheskim metodom odnomassovoi nelineinoy sistemy [Statistical Study of a One-Mass Nonlinear System]. In: *Stroitel'stvo i arkhitektura. Seismostoikoe stroitel'stvo* [Construction and Architecture. Earthquake-Resistant Construction], 1979, Series 14, Iss. 8, pp. 31–35. (In Russ.)
20. Deich A.M. Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [Methods of Identification of Dynamic Objects]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 240 p. (In Russ.)
21. Dorofeev V.M., Denisov B.E. Informatsiya inzhenerno-seismometricheskoi sluzhby o nelineinom povedenii sooruzhenii [Information of the Engineering Seismometric Service on the Nonlinear Behavior of Structures]. In *Seismostoikoe stroitel'stvo* [Earthquake-Resistant Construction], 1982, Series 14, Iss. 9, pp. 19–22. (In Russ.)
22. Dorofeev V.M., Denisov A.S. Prognoz posledstviy sil'nykh zemletryasenii [The Forecast of Consequences of Strong Earthquakes]. In: *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzhenii* [Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures], 2019, no. 1 (38), pp. 28–31. (In Russ., abstr. in Engl.)
23. Dorofeev V.M. Matematicheskaya zadacha optimizatsii seti stantsii inzhenerno-seismometricheskoi sluzhby strany [Mathematical Problem of Optimizing the Network of Stations of the Engineering Seismometric Service of the Country]. In: *Issledovaniya po teorii seismostoikosti sooruzhenii* [Research on the Theory of Seismic Resistance of Structures]. Moscow, TSNIISK named after V.A. Kucherenko, 1983, pp. 91–104. (In Russ.)