

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ: ЭМПИРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И УРОКИ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ XXI ВЕКА

И.Р. ГИЗЯТУЛЛИН✉

А.И. ФАТТАХОВА, канд. техн. наук

И.А. ПЕТРОСЯН

Т.Е. БУТИКОВА

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко,
АО «НИЦ «Строительство», ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Повышение надежности и механической безопасности зданий в сейсмоопасных регионах является одной из приоритетных задач современного строительства. Наиболее перспективным направлением в обеспечении сейсмостойкости зданий признано применение систем сейсмоизоляции, обеспечивающих снижение сейсмических нагрузок на конструктивную систему здания. В статье рассматривается проблема и подчеркивается актуальность исследования поведения зданий и сооружений с системами сейсмоизоляции в условиях реальных сейсмических воздействий, а также оценка их технического состояния после сейсмических событий.

Материалы и методы. В статье представлен обзор и критический анализ результатов оценки последствий разрушительных землетрясений, касающихся поведения сейсмоизолированных зданий и эффективности систем сейсмоизоляции. Особое внимание уделено последствиям разрушительных землетрясений, произошедших в Чили (2010), Новой Зеландии (2010), Японии (2011 и 2016), а также в Турции (2023), где наличие или отсутствие систем сейсмоизоляции существенно повлияло на сохранность зданий и сооружений критически важной инфраструктуры.

Результаты. Установлено, что системы сейсмоизоляции позволяют существенно снизить инерционные сейсмические нагрузки, обеспечивая работоспособность зданий даже при воздействиях, превышающих проектные уровни. Все современные сейсмоизолированные здания, рассмотренные в настоящей работе, выдержали сейсмические воздействия, в том числе сверхнормативные, без потери функциональности и эксплуатационной пригодности. Исключением стал случай в Турции, где зафиксированы повреждения сейсмоизолированного здания, вызванные нарушениями технологии и ошибками, допущенными на стадии строительства.

Выводы. Результаты исследования свидетельствуют о высокой эффективности современных систем сейсмоизоляции в обеспечении надежности и механической безопасности зданий при сейсмических воздействиях. Основные преимущества применения систем сейсмоизоляции включают снижение повреждаемости несущих и ограждающих конструкций, сохранение функциональности и эксплуатационной пригодности зданий во время и после сейсмического воздействия, что особенно важно для критически важной инфраструктуры. При этом отмечается важность надлежащего проектирования, строительства и технического обслуживания сейсмоизолированных зданий.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмические воздействия, динамический мониторинг, сейсмическая изоляция, система сейсмоизоляции, резинометаллические опоры, динамический отклик, демпфер, сейсмостойкость

Для цитирования: Гизятуллин И.Р., Фаттахова А.И., Петросян И.А., Бутикова Т.Е. Практическая эффективность систем сейсмоизоляции зданий: эмпирические данные и уроки разрушительных землетрясений XXI века. *Вестник НИЦ Строительство*. 2025;45(2):20–43. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-20-43](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-20-43)

Вклад авторов

Гизятуллин И.Р. – основная идея, поиск и анализ информации по теме исследования, систематизация полученных результатов, научное редактирование текста статьи.

Фаттахова А.И. – поиск и анализ информации по теме исследования, написание текста статьи.

Петросян И.А., Бутикова Т.Е. – поиск и анализ информации по теме исследования.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.04.2025

Поступила после рецензирования 03.06.2025

Принята к публикации 05.06.2025

PRACTICAL EFFICIENCY OF SEISMIC BASE ISOLATION SYSTEMS FOR BUILDINGS: EMPIRICAL DATA AND LESSONS FROM DESTRUCTIVE EARTHQUAKES OF THE 21ST CENTURY

I.R. GIZIATULLIN✉

A.I. FATTAKHOVA, Cand. Sci. (Engineering)

I.A. PETROSYAN

T.E. BUTIKOVA

Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Improving the reliability and mechanical safety of buildings in seismically hazardous regions is one of the priority tasks of contemporary construction. The most promising direction in ensuring seismic resistance of buildings is recognized as seismic base isolation systems reducing seismic loads on the building structure. The present article examines the problem and emphasizes the relevance of studying the behavior of buildings and structures with seismic base isolation systems under real seismic impacts, as well as provides the assessment of their technical condition after seismic events.

Materials and methods. The presented results of assessing the consequences of destructive earthquakes are analyzed for the behavior of base-isolated buildings and effectiveness of seismic base isolation systems. Particular attention is paid to the consequences of devastating earthquakes that occurred in Chile (2010), New Zealand (2010), Japan (2011 and 2016), and Turkey (2023), when the presence or absence of seismic base isolation systems significantly affected the safety of critical buildings and structures.

Results. Seismic base isolation systems can significantly reduce inertial seismic loads, thus ensuring the operability of buildings even under impacts exceeding design levels. All contemporary base-isolated

buildings considered in this paper withstood seismic impacts, including those above the limits, without loss of functionality and operational suitability. An exception was the case in Turkey, where the recorded damage to a base-isolated building was caused by violations of technology and errors made at the construction stage.

Conclusions. The results of the study indicate a high efficiency of contemporary seismic base isolation systems for ensuring the reliability and mechanical safety of buildings under seismic impacts. The main advantages of using seismic base isolation systems include the reduced damage to load-bearing and enclosing structures and maintained functionality and serviceability of buildings during and after seismic impacts, which is especially considerable for critical infrastructure. The importance of proper design, construction, and maintenance of base-isolated buildings is noted.

Keywords: earthquakes, seismic impacts, dynamic monitoring, seismic base isolation, seismic base isolation system, rubber-metal supports, dynamic response, damper, seismic resistance

For citation: Giziatullin I.R., Fattakhova A.I., Petrosyan I.A., Butikova T.E. Practical efficiency of seismic base isolation systems for buildings: empirical data and lessons from destructive earthquakes of the 21st century. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;45(2):20–43. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-20-43](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-20-43)

Authors contribution statement

Giziatullin I.R. – main idea, search and analysis of information on the research topic, systematization of the obtained results, scientific editing of the article text.

Fattakhova A.I. – search and analysis of information on the research topic, writing the article text.

Petrosyan I.A., Butikova T.E. – search and analysis of information on the research topic.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.04.2025

Revised 03.06.2025

Accepted 05.06.2025

Введение

Землетрясение – это не только разрушительное природное явление, приносящее страдания и потери для сотен и тысяч людей. В инженерно-научном контексте оно представляет собой уникальный и, пожалуй, наиболее достоверный натурный эксперимент, не ограниченный предпосылками и упрощениями, характерными для лабораторных испытаний или численного моделирования. Землетрясения предоставляют ценные эмпирические данные о реальном сейсмическом поведении зданий и инженерных сооружений, позволяя объективно оценивать их сейсмостойкость, выявлять уязвимости и совершенствовать подходы к их проектированию. Это обстоятельство делает каждое землетрясение источником обширной информации, необходимой для развития науки о сейсмостойкости.

К сожалению, на современном этапе развития науки и технологий предотвратить землетрясения или обеспечить их надежное краткосрочное прогнозирование все еще невозможно. В связи с этим основным и наиболее эффективным средством снижения риска сейсмических катастроф остается обеспечение высокой сейсмостойкости зданий и сооружений.

Это предполагает разработку и внедрение инженерных решений, способных обеспечить безопасность людей и устойчивость конструкций зданий и сооружений при воздействии разрушительных землетрясений. Одним из таких решений является применение систем сейсмоизоляции зданий и сооружений.

Процесс становления направления сейсмоизоляции зданий в научно-технической проблеме сейсмостойкости происходил в течение длительного времени и долгое время сдерживался отсутствием данных о поведении таких систем при сильных землетрясениях. Существенный поворот произошел после землетрясения в Нортридже (США) в 1994 году, когда были впервые получены достоверные сейсмометрические записи динамической реакции сейсмоизолированных зданий, возведенных с применением резинометаллических опор (РМО), подтверждающие значительное снижение сейсмических нагрузок по сравнению с традиционными решениями. Еще более значимый массив данных был получен во время землетрясения в Кобе (Япония) в 1995 году. Это событие стало первым в истории примером масштабного документированного наблюдения за поведением сейсмоизолированных зданий и сооружений в условиях сильного сейсмического воздействия. Наряду с инструментальными измерениями были зафиксированы и субъективные оценки со стороны местных жителей, находившихся в зданиях во время землетрясения, что дополнительно подтвердило эффективность данной технологии.

С накоплением эмпирических данных об эффективности систем сейсмоизоляции количество зданий, возводимых с их применением, за последние три десятилетия значительно возросло. Сейсмоизоляция становится наиболее востребованной технологией обеспечения сейсмостойкости, особенно для зданий, к которым предъявляются повышенные требования по обеспечению надежности, механической безопасности и эксплуатационной пригодности во время и после землетрясений расчетной интенсивности, например дошкольные, общеобразовательные и медицинские учреждения, многоэтажные и высотные здания, здания с ценным оборудованием и т. д. В современных условиях, когда растет плотность застройки и повышаются требования к безопасности городской инфраструктуры, значение систем сейсмоизоляции приобретает особую актуальность. Сопоставление экспериментальных данных, полученных в результате реальных землетрясений, с теоретическими моделями и подходами к расчетному анализу сейсмоизолированных зданий и сооружений имеет важное значение для более широкого внедрения систем сейсмоизоляции в строительную практику, особенно в регионах с высокой сейсмической активностью.

В настоящей статье рассматриваются особенности динамического поведения зданий с системами сейсмоизоляции во время наиболее разрушительных землетрясений XXI века. Представленные данные позволяют обоснованно судить об эффективности технологии и ее потенциале для широкого применения в сейсмоопасных регионах.

Материалы и методы

Настоящее исследование представляет собой обзор и критический анализ результатов оценки последствий разрушительных землетрясений, касающихся поведения сейсмоизолированных зданий и эффективности систем сейсмоизоляции. Методология исследования включала систематизацию и структурирование информации, сравнительный анализ особенностей динамического поведения зданий с системами сейсмоизоляции во время

разрушительных землетрясений, а также теоретическое обобщение эмпирических данных с выделением ключевых факторов, влияющих на эффективность систем сейсмоизоляции. Особое внимание уделено последствиям разрушительных землетрясений, произошедших в Чили (2010), Новой Зеландии (2010), Японии (2011 и 2016), а также в Турции (2023), где наличие или отсутствие систем сейсмоизоляции существенно повлияло на сохранность зданий и сооружений критически важной инфраструктуры.

Результаты исследования

За последние десятилетия человечество неоднократно сталкивалось с разрушительными землетрясениями, которые не только унесли десятки тысяч жизней, но и продемонстрировали уязвимость даже современных конструктивных решений. Анализ последствий таких сейсмических событий играет ключевую роль в совершенствовании нормативных требований, подходов к расчету конструкций и внедрению инновационных технологий сейсмозащиты, таких как системы сейсмоизоляции. Особенно показательные с этой точки зрения землетрясения, произошедшие в Чили (2010), Новой Зеландии (2010), Японии (2011 и 2016), а также в Турции (2023). В табл. 1 приведены основные параметры указанных землетрясений.

Таблица 1

Основные параметры крупных разрушительных землетрясений XXI века

Table 1

Main parameters of large destructive earthquakes of the 21st century

№	Дата	Регион/ страна	Магнитуда	Глубина очага, км	Тип тектонического механизма	Погибших (оценочно), человек	Основные последствия
1	27.02.2010	Мауле, Чили	8,8	~35	Субдукция (океаническая плита)	≈525	Массовые разрушения в центральной части страны, цунами, повреждено >370 тыс. зданий
2	04.09.2010	Крайстчерч, Новая Зеландия	7,1	~11	Сдвиговое (разлом)	0	Разрушения в городской застройке, повреждена инфраструктура
3	11.03.2011	Тохоку, Япония	9,1	~32	Субдукция (океаническая плита)	~20 000	Цунами до 40 м, авария на АЭС Фукусима, более 400 000 зданий разрушено
4	16.04.2016	Кумамото, Япония	7,3	~11	Внутри-континентальное сдвиговое	>50	Серия толчков, разрушены мосты, дома, более 180 тыс. человек эвакуированы
5	06.02.2023	Турция и Сирия	7,8 и 7,5	~17	Сдвиговое (Анатолийский разлом)	>50 000	Обрушение или сильные повреждения более 160 000 зданий, гуманитарная катастрофа в приграничных регионах

Далее приведены результаты оценки поведения сейсмоизолированных зданий при рассматриваемых разрушительных землетрясениях.

Поведение сейсмоизолированных зданий при землетрясении в Мауле, Чили (2010)

Землетрясение в Чили (2010) – одно из крупнейших за последние полвека, произошедшее 27 февраля вблизи побережья Чили. Очаг землетрясения находился на глубине 35 километров, в 90 километрах от столицы Био-Био Консепсьон. Регионы Био-Био и Мауле пострадали больше всего. По имеющимся данным, эпицентр землетрясения располагался в 150 километрах к юго-западу от столицы страны – Сантьяго [1].

В Университете Чили совместно с компанией Sarrazin & Moroni в 1992 году была разработана недорогая система сейсмоизоляции здания, которая в последующем была апробирована в проекте жилого комплекса в Андалусии, состоявшего из одного сейсмоизолированного здания и двух зданий без сейсмоизоляции. Для определения эффективности системы сейсмоизоляции здание было оборудовано станцией динамического мониторинга.

Рассматриваемый объект представляет собой 4-этажное здание габаритными размерами в плане 10×6 м, с интегрированной системой сейсмоизоляции в виде 8 резиновых опорных частей диаметром 31,5 см и высотой 32 см (рис. 1). Сейсмоизолирующие опоры выдерживают вертикальную нагрузку в 350 кН при горизонтальном смещении в 200 мм (100%-ная деформация) [2].

Несмотря на магнитуду $M_w = 8,8$, землетрясение не причинило никакого ущерба сейсмоизолированному зданию или его содержимому. Наибольшие ускорения на уровне грунта основания здания составили $0,30g$ и $0,18g$ в горизонтальном и вертикальном направлениях

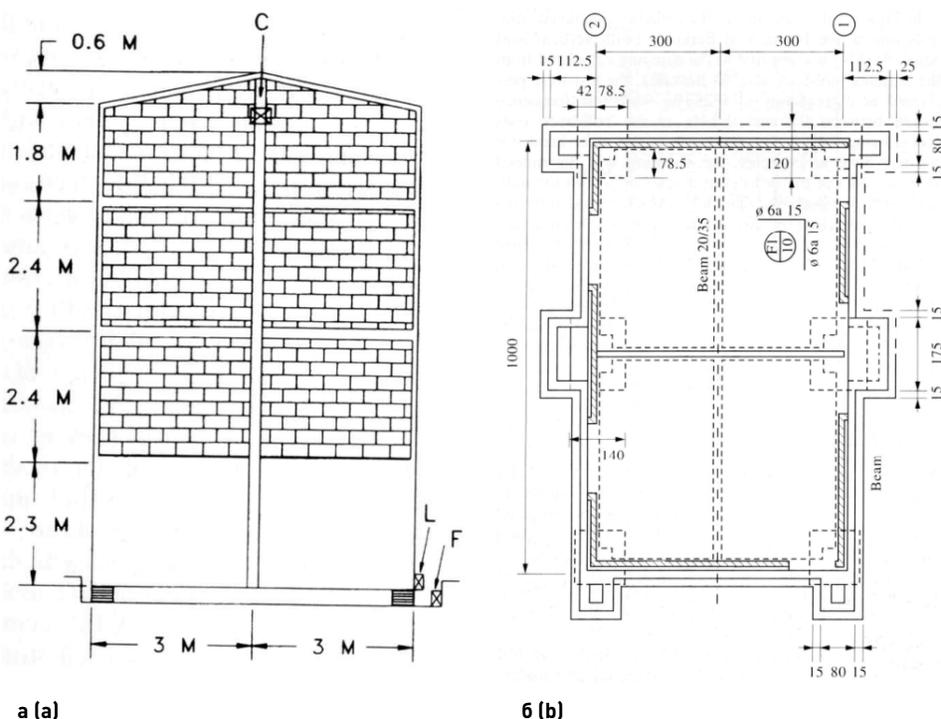
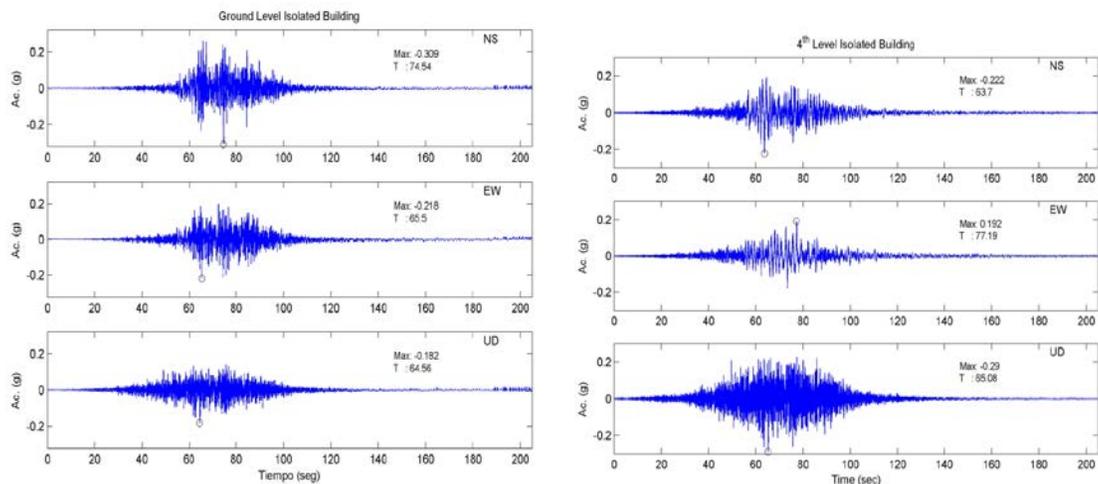


Рис. 1. Жилое сейсмоизолированное здание в Андалусии: а – поперечный разрез; б – габариты в плане [2]
Fig. 1. Residential base-isolated building in Andalusia: a – cross-section; b – dimensions in plan [2]



a (a)

b (b)

Рис. 2. Записи ускорений колебания сейсмоизолированного здания в Андалусии: а – на уровне грунта; б – на уровне 4-го этажа [1]

Fig. 2. Acceleration records for a base-isolated building in Andalusia: a – ground level; b – 4th floor level [1]

соответственно (рис. 2). Максимальное горизонтальное ускорение, зарегистрированное внутри сейсмоизолированного здания, составило 0,22g. В вертикальном направлении наблюдалось усиление ускорений, поскольку максимальное ускорение, зарегистрированное на уровне верха здания, составило 0,29g.

Для анализа динамических параметров сейсмоизолированного здания были выбраны три временных интервала, каждый продолжительностью 8 секунд. Этот подход позволяет идентифицировать изменения динамических параметров здания между выбранными временными интервалами. В табл. 2 показаны изменения резонансных частот и коэффициентов демпфирования здания, идентифицированные для каждого рассматриваемого временного интервала. По данным табл. 2 можно заметить, что резонансные частоты сильно зависят и изменяются в зависимости от амплитуды воздействия.

Таблица 2

Идентифицированные динамические параметры сейсмоизолированного здания в Андалусии во время основного землетрясения [1]

Table 2

Identified dynamic parameters of a base-isolated building in Andalusia during the major earthquake [1]

Модальные частоты, Гц			Модальные коэффициенты демпфирования, %		
30–38 с	70–78 с	110–118 с	30–38 с	70–78 с	110–118 с
1,86	0,62	1,89	2,7	23,7	22,3
2,23	0,78	2,00	12,7	41,8	–
2,99	2,34	3,06	17,9	50,5	19,9
14,11	16,42	18,63	3,9	3,0	2,3

Таблица 3

**Идентифицированные динамические параметры сейсмоизолированного здания
 в Андалусии во время афтершока 11 марта [1]**

Table 3

**Identified dynamic parameters of a base-isolated building in Andalusia during the aftershock
 of March 11 [1]**

Модальные частоты, Гц			Модальные коэффициенты демпфирования, %		
20–30 с	40–50 с	60–70 с	20–30 с	40–50 с	60–70 с
2,34	1,51	2,07	21,6	16,6	22,6
2,62	1,65	2,12	24,1	14,3	30,9
18,26	14,05	10,54	4,1	17,0	2,1

После основного землетрясения 11 марта произошел один из сильнейших афтершоков. Наибольшее ускорение в уровне грунта основания здания достигало в горизонтальной плоскости 0,03g в обоих направлениях. В вертикальном направлении максимальное зарегистрированное ускорение в уровне грунта основания здания составило 0,02g. Общая продолжительность землетрясения составила около 60 секунд. Фаза сильных колебаний длилась более 20 секунд в интервале от 30 до 50 секунд.

Из процесса анализа поведения и идентификации динамических параметров здания можно заметить, что первые две резонансные частоты связаны с системой сейсмоизоляции (табл. 3). Об этом свидетельствует уменьшение резонансных частот ниже 2 Гц во втором временном интервале по сравнению с соответствующими двумя частотами первого временного интервала. Самые высокие коэффициенты демпфирования системы наблюдаются в начале и конце записи, в первом и третьем временных интервалах, достигая значений, превышающих 20% критического демпфирования. Важно отметить, что снижение резонансных частот во время сильных колебаний показывает, что система сейсмоизоляции эффективно воздействует на конструктивную систему здания, повышая ее гибкость.

Землетрясение 2010 года стало поворотным моментом в сейсмостойком строительстве в Чили. После этого землетрясения интерес к системам сейсмоизоляции в Чили значительно возрос. До данного землетрясения лишь несколько объектов предусматривали системы сейсмоизоляции, включая две крупные больницы, мосты и жилые здания. При этом в городах Талька, Курико и Каукенес разрушились больницы, в общей сложности пострадало 130 больниц, что составляет 71% от всех государственных больниц Чили [3]. Многие мосты без систем сейсмоизоляции получили повреждения, например каменный арочный мост XIX века через Рио-Кларо (рис. 3). Всего было повреждено около 300 мостов.

После землетрясений в Мауле необходимость использования систем сейсмоизоляции стала обязательной как для больниц, так и для мостов. Жилые комплексы, центры обработки данных, высокотехнологичные лаборатории и офисные здания также преимущественно возводились с применением систем сейсмоизоляции (рис. 4).

Системы сейсмоизоляции на сегодняшний день хорошо зарекомендовали себя в Чили и нашли широкое применение. В 2014 и 2015 годах в Чили произошли два землетрясения магнитудой Mw более 8,0, которые стали еще одним напоминанием о высокой сейсмической активности в регионе. Опыт эксплуатации сейсмоизолированных зданий убедительно продемонстрировал целесообразность использования таких систем не только в малоэтажных



a (a)



б (b)

Рис. 3. Общий вид моста Рио-Кларо: *a* – после землетрясения; *б* – на этапе восстановления с применением систем сейсмоизоляции [3]

Fig. 3. General view of the Rio Claro Bridge: *a* – after the earthquake; *b* – at the stage of restoration using seismic base isolation systems [3]



a (a)



б (b)

Рис. 4. Примеры объектов в Чили, возводимых с применением систем сейсмоизоляции: *a* – жилой комплекс в коммуне Ньюноа; *б* – центр обработки данных Claro [3]

Fig. 4. Buildings constructed in Chile using seismic base isolation systems: *a* – residential complex in the Nuñoa commune; *b* – Claro data center [3]

зданиях, но и в зданиях средней этажности и многоэтажных зданиях, несмотря на прежние сомнения со стороны профессионального сообщества. Результаты исследований показали, что внедрение систем сейсмоизоляции существенно повышает надежность и механическую безопасность зданий, снижает вероятность повреждения и экономических потерь во время и после сильных землетрясений.

Поведение сейсмоизолированных зданий при Кентерберийском землетрясении, Новая Зеландия (2010)

Землетрясение магнитудой $M_w = 7,1$, произошедшее 4 сентября 2010 года в регионе Кентерберри на Южном острове Новой Зеландии, известно как «Крайстчерчское» или «Дарфилдское». По шкале Меркалли интенсивность землетрясения оценивалась в 10 баллов, эпицентр находился в 40 км западнее Крайстчерча, около городка Дарфилд, гипоцентр находился на глубине 11 км. Сильные афтершоки продолжались и в 2011 году: сильнейший из них, магнитудой $M_w = 6,3$, произошел 22 февраля 2011 года и ощущался от Инверкаргилла до Веллингтона. В результате землетрясения 2010 года пострадали более 100 человек, двое получили тяжелые травмы. Повреждения получили свыше половины зданий Крайстчерча и окрестностей. Общий экономический ущерб от землетрясения оценивался в 40 миллиардов новозеландских долларов [4].

Все медицинские учреждения региона, включая отделение неотложной помощи госпиталя Крайстчерча, сохраняли работоспособность как во время основного землетрясения, так и после него. Женская больница, введенная в эксплуатацию в 2005 году, до сих пор остается единственным сейсмоизолированным зданием на Южном острове [5]. Здание размерами 76×32 м в плане и высотой 33 м включает девять уровней, включая подвальный этаж, в котором расположена система сейсмоизоляции. Система сейсмической изоляции здания предусмотрена из 41 резинометаллической опоры со свинцовым сердечником (размером $830 \times 830 \times 275$ мм), изготовленной из натурального каучука. Система сейсмоизоляции рассчитана на максимальные перемещения в диапазоне ± 420 мм. Общий вид здания приведен на рис. 5.

Данные динамического мониторинга и результаты численных расчетов здания женской больницы Крайстчерча позволили проанализировать работу системы сейсмоизоляции здания во время Кентерберийского землетрясения. Максимальные смещения сейсмоизолирующих опор составили в диапазоне 80–100 мм, при этом остаточное смещение в северном направлении достигало примерно 25 мм (рис. 6) [6].

Сравнение ускорений и смещений между результатами численных расчетов и натурными данными показывает соответствие значений жесткости сейсмоизолирующих опор, примерно



Рис. 5. Общий вид здания женской больницы Крайстчерча [5]
Fig. 5. General view of the Christchurch Women's Hospital building [5]



Рис. 6. Остаточное смещение резинометаллической сейсмоизолирующей опоры в осях «F»–«З» [6]
Fig. 6. Residual displacement of the rubber-metal seismic base isolation support in *F*-3 axes [6]

в два раза превышающих значения, принятые в проекте и полученные в рамках испытаний. Однако предварительное упрощенное численное моделирование реакции здания женской больницы Крайстчерча на рассматриваемое землетрясение 4 сентября 2010 года показывает, что перемещения резинометаллических опор могли превысить их предел текучести [4].

Инспекции после землетрясения выявили незначительные повреждения только в ненесущих конструкциях перегородок и инженерных коммуникациях. Так были обнаружены повреждения водопроводных труб в зоне пересечения сейсмоизолирующего шва, выполненных без необходимых гибких соединений, позволяющих компенсировать значительные перемещения в уровне сейсмоизолирующего шва, а также трещины в гипсокартонных обшивках каркасно-обшивных перегородок [7]. Несмотря на большую магнитуду землетрясения, повреждения зданий и сооружений и причиненный экономический ущерб были относительно минимальными.

Поведение сейсмоизолированных зданий при землетрясении Тохоку, Япония (2011)

Великое восточно-японское землетрясение, произошедшее в 2011 году у восточного побережья острова Хонсю в Японии, магнитудой $M_w = 9,1$, является одним из сильнейших и крупнейших в мире. Эпицентр землетрясения был восточнее острова Хонсю, в 130 км к востоку от города Сендай и в 373 км к северо-востоку от Токио. Гипоцентр наиболее разрушительного подземного толчка находился на расстоянии около 70 км от ближайшей точки побережья Японии на глубине 32 км [8].

В табл. 4 приведен краткий список сейсмоизолированных зданий, оснащенных системой динамического мониторинга, с максимальными параметрами их колебаний при рассматриваемом землетрясении [9].

Таблица 4

**Результаты измерений колебаний сейсмоизолированных зданий во время землетрясения
 Тохоку 2011 года [9]**

Table 4

Vibration data for base-isolated buildings during the Tohoku earthquake in 2011 [9]

Префектура	Тип здания	Этажность	Система изоляция	Макс. ускорение, см/с ²			Макс. смещение сейсмоизолирую- щего слоя, см
				Основание	1-й этаж	Верхний этаж	
Аомори	Офис	10	LRB	104	122	123	2
Ивате	Больница	6	NRB+ +LRB+SLB+SD	305	83	183	9
Мияги	Жилой дом	2	SLB	508	185	–	26
	Офис	5	HDR	345	177	224	11
	Офис	6	DR	381	200	209	18
	Офис	9	HDR+OIL	289	121	142	18
	Офис	18	NRB+SLB	311	173	194	23
Фукусима	Офис	2	NRB+ +LRB+SLB+OIL	756	213	155	24
	Офис	3	LRB+SLB+OIL	411	184	154	–
Ибараки	Исследовательская лаборатория	3	NRB+SD+LD	296	–	121	6
	Исследовательская лаборатория	5	NRB+LD	305	238	203	19
	Офис	7	NRB+LRB+SD	327	92	126	6
	Многоквартирный дом	21	NRB+SD+LD	402	185	181	15
Тиба	Многоквартирный дом	4	LRB	170	101	107	3
	Многоквартирный дом	4	HDR	169	149	139	5
	Офис	8	NRB+HDR	219	97,5	137	5
	Исследовательская лаборатория	2	NRB+SD	143	113	120	4
	Многоквартирный дом	3	NRB+OIL	90	54	90	5
	Музей	4	DR	100	76	104	4
	Офис	4	NRB+SLB	95	75	75	3
Токио	Исследовательская лаборатория	6	LRB	132	69	72	9
	Офис	11	NRB+LRB+OIL	104	55	94	5
	Многоквартирный дом	12	NRB+LRB	100	53	61	7
	Школа	26	NRB+OIL	98	29	46	9
	Многоквартирный дом	36	NRB+LRB	129	100	116	15
	Школа	7	HDR	147	51	99	7
Канагава	Школа	7	NRB+OIL	71	54	57	12

Примечание: NRB (Natural Rubber Bearing) – резинометаллическая опора из натурального каучука; HDR (High Damping Rubber Bearing) – резинометаллическая опора с высоким демпфированием; LRB (Lead Rubber Bearing) – резинометаллическая опора со свинцовым сердечником; SLB (Sliding Bearing) – скользящая опора; OIL (Oil Damper) – масляный (гидравлический) демпфер; SD (Steel Damper) – стальной демпфер; LD (Lead Damper) – свинцовый демпфер.

Анализ применения различных систем сейсмоизоляции в сейсмоопасных регионах, представленных в табл. 4, показал, что использование комбинаций различных видов сейсмоизолирующих опор и различных видов демпферов позволяет эффективно снижать воздействие сейсмических нагрузок на здания. Разнообразие систем сейсмоизоляции, применяемых в разных префектурах Японии, свидетельствует о высоком уровне индивидуализации решений в зависимости от конструктивных решений зданий и возможной интенсивности сейсмических воздействий на конкретной площадке.

Наибольшее использование получили комбинации из резинометаллических опор без и со свинцовым сердечником, а также скользящих опор, что подтверждает их эффективность в обеспечении сейсмостойкости зданий различного назначения, включая офисы, школы, исследовательские лаборатории и жилые дома. В то же время для многоэтажных и высотных зданий (например, в префектурах Мияги и Фукусима) часто применяются более сложные системы сейсмозащиты, включающие сочетания резинометаллических и скользящих опор и гидравлических демпферов, что позволяет обеспечить высокие показатели сейсмостойкости.

Максимальные значения ускорений и смещений сейсмоизолирующего слоя, приведенные в табл. 4, варьируются в зависимости от типа используемой системы сейсмоизоляции, этажности зданий и интенсивности сейсмических воздействий на площадке. Важно отметить, что увеличение этажности зданий вызывает более высокие значения ускорений и смещений сейсмоизолирующего слоя, что подтверждает необходимость учета этого фактора при проектировании. Для малоэтажных и среднеэтажных зданий применяются более простые системы сейсмоизоляции, что отражает специфику сейсмостойкого проектирования для этих объектов.

Таким образом, результаты анализа подтверждают важность выбора подходящей системы изоляции с учетом этажности здания, его назначения и локальных сейсмических условий на конкретной площадке строительства. Внедрение комплексных решений сейсмоизолирующих систем и дальнейшая оптимизация конструктивных решений играют ключевую роль в обеспечении сейсмостойкости современных зданий, возводимых в сейсмоопасных районах.

После Великого восточно-японского землетрясения 2011 года Японское общество по сейсмической изоляции (JSSI) провело обследование 327 сейсмоизолированных зданий [10]. Выяснилось, что сейсмоизолированные части зданий практически не получили повреждений. Это доказало эффективность примененных систем сейсмоизоляции, обеспечивших снижение сейсмических нагрузок на здание. С другой стороны, в некоторых элементах систем сейсмозащиты были зафиксированы различные повреждения, свидетельствующие о значительных нагрузках, воспринятых данными устройствами. Например, в свинцовых демпферах системы сейсмоизоляции было обнаружено множество трещин (рис. 7). Ослабленные болты, отслаивающаяся краска и остаточные деформации наблюдались у стальных демпферов (рис. 8а). Были обнаружены незначительные повреждения защитной панели антисейсмического шва между полом и изолированной частью здания (рис. 8б), однако они не повлияли на общую работоспособность систем сейсмоизоляции.

Таким образом, проведенное обследование позволило сделать вывод о высокой надежности и механической безопасности зданий с примененными системами сейсмоизоляции, а также указало на необходимость периодических инспекций и обслуживания элементов систем сейсмоизоляции после сильных сейсмических воздействий.



Рис. 7. Трещина на поверхности свинцового демфера [11]
Fig. 7. Surface crack of the lead damper [11]



а (a)

б (b)

Рис. 8. Примеры обнаруженных повреждений: а – остаточная деформация U-образного стального демфера; б – повреждение защитной ограждающей панели антисейсмического шва [12]

Fig. 8. Examples of detected damage: a – residual deformation of the U-shaped steel damper; b – damage to the protective cover panel of the seismic gap [12]

Поведение сейсмоизолированных зданий при землетрясении Кумамото, Япония (2016)

В районе префектуры Кумамото произошла серия разрушительных землетрясений: первое (магнитудой $M_w = 6,5$) произошло 14 апреля 2016 года, а второе, основное (магнитудой $M_w = 7,3$) 16 апреля 2016 года, с гипоцентром на глубине около 11 километров [13]. На момент этих сейсмических событий в префектуре эксплуатировались 24 здания различного функционального назначения, оснащенные системами сейсмоизоляции. В восьми из этих зданий были установлены специальные устройства – так называемые «скретч-пластины» (scratch plates), предназначенные для регистрации горизонтальных перемещений сейсмоизолирующего слоя здания. Эти устройства позволяют регистрировать перемещения сейсмоизолирующего слоя здания путем нанесения царапин на металлическую пластину.

В табл. 5 приведены максимальные амплитуды, зарегистрированные на скретч-пластинах зданий различного назначения префектуры Кумамото.

На рис. 9 представлены общий вид скретч-пластины, предусмотренной в больнице города Машики, и амплитуды перемещений сейсмоизолирующего слоя, зарегистрированные скретч-пластиной.

Согласно данным сейсмографа, установленного в городе Машики, амплитуда сейсмического воздействия на грунте превысила предельные значения, регламентированные действующими стандартами [15]. В работе [16] отмечается, что здания, возведенные после 1981 года и относящиеся к категории «новых сейсмостойких зданий», получили минимальные повреждения. В то же время постройки более ранних лет испытали значительные повреждения и потребовали проведения серьезных восстановительных работ.

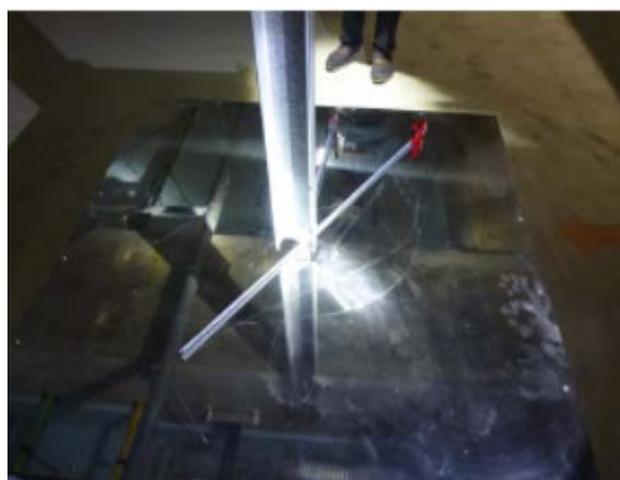
Таблица 5

Максимальные амплитуды, записанные на скретч-пластинах [13]

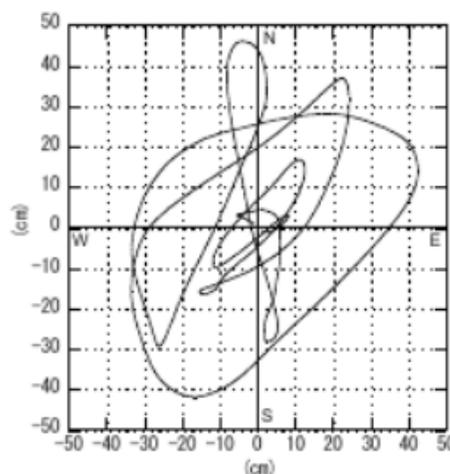
Table 5

Maximum amplitudes recorded on scratch plates [13]

Здание	Максимальный размах амплитуды, см	Максимальный полуразмах амплитуды, см
Стационарное отделение больницы Кумамото	60	38
Амбулаторное отделение больницы Кумамото	72	41
Офисное здание в Кумамото	74	40
Больница города Ямага	19	10
Офисное здание в городе Ямага	16	8
Склад в Кикучигане	50	32,5
Больница города Асо	90	46



a (a)



b (b)

Рис. 9. Общий вид скретч-пластины, предусмотренной в больнице города Машики (a); амплитуды перемещений сейсмоизолирующего слоя, зарегистрированные скретч-пластиной (b) [13, 14]

Fig. 9. General view of the scratch plate in the Mashiki hospital (a); recorded displacement amplitudes of the seismic base isolation layer (b) [13, 14]

В ряде исследований также приведены данные обследований многоэтажных жилых зданий [17]. В частности, опрос жителей 15-этажного сейсмоизолированного железобетонного жилого дома в городе Кумамото, построенного в 1998 году, показал их удовлетворенность эксплуатационными характеристиками здания после землетрясения, а повседневная жизнь могла продолжаться в обычном режиме.

Еще одним наглядным примером является ситуация в городе Яцусиро, находящемся на значительном расстоянии от гипоцентра. Жители верхних этажей сейсмоизолированного многоквартирного жилого дома отмечали плавное раскачивание здания во время основного толчка, без падения мебели и каких-либо повреждений несущих и ограждающих конструкций сейсмоизолированной части здания. В то же время жильцы расположенного поблизости 10-этажного жилого здания без предусмотренных специальных систем сейсмозащиты были вынуждены эвакуироваться на улицу и ожидать завершения мероприятий по проверке безопасности здания после землетрясения.

В статье [13] отмечается наличие повреждений элементов ограждения антисейсмических швов здания в зоне устройства сейсмоизолирующего слоя (рис. 10). Причиной выявленных повреждений элементов ограждения антисейсмических швов стала не только превышающая расчетную величину сила сейсмического воздействия, но и недостаточное внимание проектировщиков к возможным относительным смещениям отдельных частей сейсмоизолированного здания в процессе землетрясения.



Рис. 10. Поврежденный элемент ограждения антисейсмического шва [13]

Fig. 10. Damaged element of the seismic gap cover [13]

Поведение сейсмоизолированных зданий при землетрясении в провинции Кахраманмараш, Турция (2023)

6 февраля 2023 года в южной части Центральной Турции и на северо-западе Сирии произошло мощное землетрясение магнитудой $M_w = 7,8$. Спустя примерно 9 часов в соседнем районе провинции Кахраманмараш было зафиксировано еще одно сильное землетрясение магнитудой $M_w = 7,5$. Расстояние между эпицентрами этих двух событий составило около 100 км. Данная серия землетрясений стала крупнейшей в Турции со времен разрушительного Эрзинджанского землетрясения 1939 года. Стихийное бедствие затронуло не менее 13,5 миллионов человек, что составляет примерно 16% населения Турции, и привело к разрушению или сильным повреждениям около 160 000 зданий [18].

Среди наиболее пострадавших объектов инфраструктуры провинций городов оказались медицинские учреждения. На рис. 11 показано расположение 12 обследованных зданий больниц, а также эпицентров землетрясений и станций регистрации сильных движений грунта в регионе [19, 20]. Каждое здание обозначено заглавной

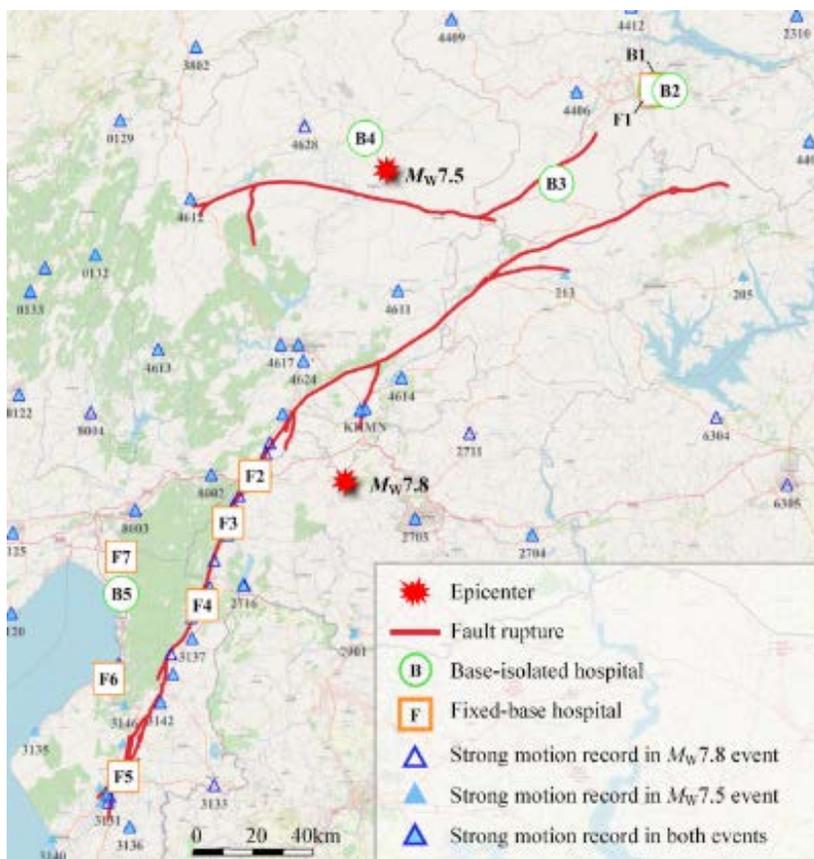


Рис. 11. Расположение зданий больниц и станций регистрации сильных движений грунта в регионе, пострадавшем от землетрясения 2023 года [19, 20]

Fig. 11. Location of hospital buildings and strong-motion recording stations in the region affected by the 2023 earthquake [19, 20]

буквой и номером: буква «В» указывает на наличие системы сейсмоизоляции, а «F» – на ее отсутствие.

Пять больниц, расположенных в северной части региона, испытали наибольшее воздействие от второго землетрясения магнитудой $M_w = 7,5$. В их числе – здания больниц B1, B2, B3 и F1, находящиеся в провинции Малатья, а также больница B4, расположенная в провинции Кахраманмараш. Оставшиеся семь больниц, размещенные в юго-западной части пострадавшего региона, подверглись более сильному воздействию от первого землетрясения магнитудой $M_w = 7,8$. При этом здания F2 и F3 располагались на территории провинции Газиантеп, а остальные пять больниц – в провинции Хатай. Особенно следует отметить больницы F2, F3, F4 и F5, которые находились в пределах 2 км от линии поверхностного разрыва грунта. В частности, здание F3 было расположено всего в 50 метрах от зоны проявления разлома на поверхности [21].

В табл. 6 обобщена основная информация о 12 исследованных зданиях больниц. Все здания имеют не более 10 этажей.

За исключением больниц F6 и F7, большинство исследованных зданий были построены после 2001 года, когда в Турции были значительно обновлены и ужесточены требования

Таблица 6

Информация о больницах, подвергшихся воздействию землетрясения [21]

Table 6

Information on hospitals affected by the earthquake [21]

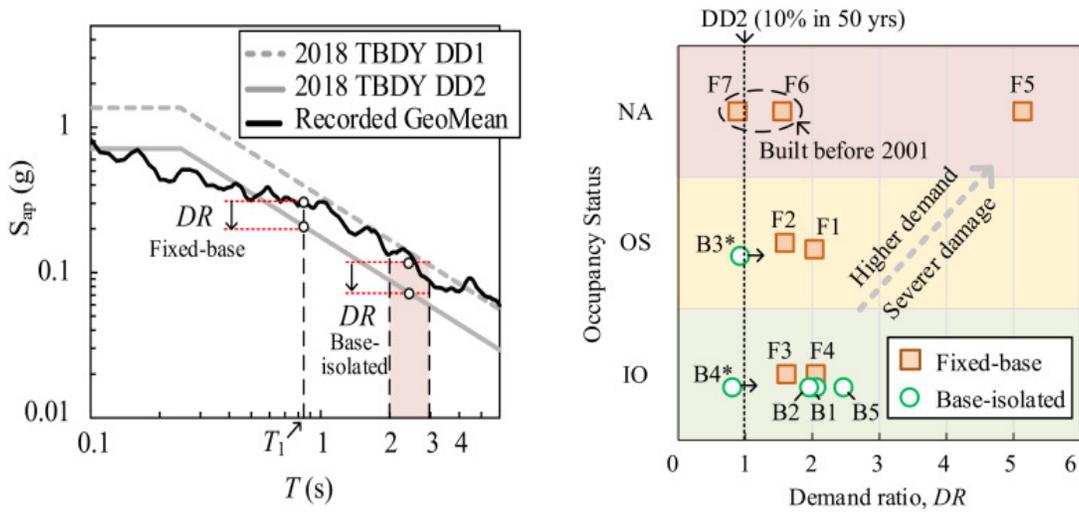
Наличие систем сейсмозащиты	Наименование	Кол-во этажей	Год возведения	Степень сохранности объекта	Расчетный период колебаний здания T_1 , с	Коэффициент, DR
Предусмотрены системы сейсмоизоляции	V1 – Больница Малатьи для беременных и детей	3; 7	2019	IO	2–3	2,06
	V2 – Государственная больница Батталгази	7	2020	IO	2–3	1,95
	V3 – Государственная больница Доганшехира	6	2019	OS	2–3	0,92
	V4 – Государственная больница Эльбистана	3; 9	2017	IO	2–3	0,81
	V5 – Государственная больница в Дертиоле	3; 10	2021	IO	2–3	2,46
Отсутствуют системы сейсмоизоляции	F1 – Исследовательская больница в Малатье	3; 10	2013	OS	1,03	2,03
	F2 – Государственная больница Нургади	2	2003/2015	OS	0,31	1,59
	F3 – Государственная больница Ислахийе	4	2014	IO	0,52	1,62
	F4 – Государственная больница Хасса	3	2022	IO	0,42	2,05
	F5 – Исследовательская больница в Хатай	5; 8	2001/2013	NA	0,87	5,14
	F6 – Государственная больница Искендеруна	2; 6	1968	NA	0,70	1,55
	F7 – Эрзинская государственная больница	2	1994	NA	0,31	0,89

Примечание:

1. Степень сохранности объекта расшифровывается как: возможность бесперебойной эксплуатации (IO); эксплуатация здания приостановлена (OS) и отсутствие возможности эксплуатации (NA).
2. Коэффициент DR отражает, насколько фактическое сейсмическое воздействие при землетрясениях превысило проектные значения уровня DD2 по национальному стандарту для рассматриваемого здания.

к сейсмостойкому проектированию зданий и сооружений [22, 23]. Все пять зданий больниц с системами сейсмоизоляции введены в эксплуатацию после 2013 года, когда нормативные положения для таких объектов в сеймоопасных регионах стали еще более строгими [21, 24, 25].

На рис. 12а представлен график спектров реакции максимальных ускорений зарегистрированного землетрясения и нормативных сейсмических воздействий уровня DD1 и DD2 (в соответствии с национальным стандартом), отражающий превышение (коэффициент DR) уровня фактического сейсмического воздействия над принятым при проектировании рассматриваемых зданий больниц с системами сейсмоизоляции и без них. Эти значения также сопоставлены со степенями сохранности каждой больницы (рис. 12б), что позволяет приблизительно оценить то, насколько сильными были фактические сейсмические воздействия, испытанные зданиями в ходе двух последовательных землетрясений, по сравнению с учтенными в проекте.



а (а) **б (б)**
Рис. 12. Спектры реакции максимальных ускорений зарегистрированного землетрясения и нормативных сейсмических воздействий уровня DD1 и DD2 [а] [24]; взаимосвязь степени сохранности зданий после землетрясения и коэффициента DR для исследованных зданий больниц [б] [24]
Fig. 12. Ratios of DR coefficients to response spectra [а] [24]; relationship between the degree of building preservation after an earthquake and DR coefficients for the studied hospital buildings [б] [24]

По результатам рассмотрения рис. 12б можно сделать следующие выводы:

1. Для большинства исследованных зданий фактическое сейсмическое воздействие превысило проектный уровень землетрясения (DD2), регламентированный нормативными требованиями. Учитывая, что уровень DD1 (вероятность превышения 2% за 50 лет) примерно в два раза выше DD2, пять объектов испытали нагрузки, превосходящие даже максимально допустимые расчетные значения.

2. За исключением здания В3, большая часть зданий с системой сейсмоизоляции успешно обеспечила требуемый уровень функциональности сразу после землетрясения, несмотря на превышение проектного уровня воздействия.

Четыре из пяти зданий больниц с системами сейсмоизоляции расположены в северной части региона, пострадавшего от землетрясений. Повреждения зданий в этом районе в большей степени связаны с землетрясением магнитудой $M_w = 7,5$, а не с более ранним, хотя и более сильным событием магнитудой $M_w = 7,8$ [26].

Особого внимания заслуживает больничный комплекс в городе Малатя, включающий два корпуса: В1 – главное лечебное здание с системой сейсмоизоляции (построено в 2019 году), F1 – учебно-исследовательский корпус без систем сейсмоизоляции, соединенный с В1 крытым переходом. В корпусе В1 предусмотрено 246 фрикционных маятниковых опор с расчетной амплитудой перемещений ± 360 мм, установленных в подземном паркинге.

Несущие конструкции обоих корпусов серьезных повреждений не получили, однако степень разрушений несущих конструкций существенно различалась. В здании В1 повреждения ограничились зоной сейсмоизолирующего слоя: зафиксированы трещины в кирпичной кладке перегородок подземного паркинга, смещения металлических пластин в зоне антисейсмических швов сейсмоизолирующего слоя. Инженерные коммуникации,

проходящие через сейсмоизолирующий слой, остались невредимыми благодаря гибким соединениям. Самым значительным повреждением оказалось разрушение металлических накладок в зоне антисейсмического шва сейсмоизолирующего слоя между корпусом В1 и переходом [26]. Корпус F1 без систем сейсмоизоляции получил при этом более серьезные повреждения: обширные трещины в кладке, разрушение подвесных потолков, падение керамической плитки.

Примерно в 5 км к востоку от больницы в г. Малатья находилось еще одно сейсмоизолированное здание больницы В2 (государственной больницы Батталгази). Оно было построено в 2020 году и имеет 7 надземных этажей. По данным обследования, в здании не было выявлено ни конструктивных, ни неконструктивных повреждений, и оно продолжило работу сразу после землетрясения. Также отсутствовали признаки остаточных деформаций сейсмоизолирующего слоя [27].

Здание В3 государственной больницы, расположенной в провинции Малатья в небольшом городе Догансэхир, хоть и было построено в 2019 году, а также было оснащено системой сейсмоизоляции, получило значительные повреждения. Здание расположено примерно в 123 км от эпицентра землетрясения магнитудой $M_w = 7,8$ и в 57 км от землетрясения магнитудой $M_w = 7,5$. Изучение причин значительных повреждений показало, что при обратной засыпке котлована во время строительства сейсмоизолирующий слой был заблокирован и не включался в работу во время землетрясения. Таким образом, эффективность систем сейсмоизоляции зависит не только от их наличия, но и от качества реализации проектных решений и строительных работ. Произошедшие в феврале 2023 года землетрясения показали, что большинство сейсмоизолированных зданий выдержали сейсмические воздействия, превышающие расчетные значения, принятые при проектировании.

Заключение и обсуждение

Результаты исследований, представленные в данной статье, свидетельствуют о высокой эффективности современных систем сейсмоизоляции в обеспечении надежности и механической безопасности зданий при сейсмических воздействиях. Применение систем сейсмоизоляции позволяет существенно снизить уровень инерционных сейсмических нагрузок, передаваемых на сейсмоизолированную часть здания, тем самым снижая нагрузку на несущие и ограждающие конструкции, их повреждаемость, а также обеспечивая сохранность инженерного оборудования и внутреннего содержимого зданий.

Применение систем сейсмоизоляции позволяет значительно сократить объемы восстановительных работ и сопутствующие финансовые затраты после землетрясений. Это делает системы сейсмоизоляции не только технически эффективными, но и экономически целесообразными при долгосрочной эксплуатации зданий в сейсмоопасных районах.

Эмпирические данные по разрушительным землетрясениям XXI века подтверждают, что применение систем сейсмической изоляции зданий позволяет более чем в 2 раза снизить горизонтальные сейсмические нагрузки, в зависимости от характеристик сейсмического воздействия и конструктивных особенностей здания и системы сейсмоизоляции. Подобное снижение расчетных сейсмических нагрузок обеспечивает значительный экономический эффект при сохранении высокого уровня надежности и механической безопасности здания.

Эффективность применения систем сейсмоизоляции получила наглядное подтверждение в ходе последних разрушительных землетрясений, произошедших в Турции в 2023 году. Характерным примером служит больничный комплекс в городе Малатья, состоящий из двух корпусов, возведенных в различные годы. Новый корпус, оснащенный системой сейсмоизоляции, сохранил эксплуатационную пригодность и продолжил работу во время и после землетрясения, в то время как старое здание, не имеющее системы сейсмоизоляции, получило значительные повреждения, что привело к временному ограничению его в эксплуатации. Не менее показательным является случай с больницей в городе Догансэхир, где ненормативные повреждения сейсмоизолированного здания были обусловлены ошибками, допущенными в процессе строительства. Данный инцидент подчеркивает не только необходимость внедрения систем сейсмоизоляции, но и важность надлежащего проектирования, строительства и технического обслуживания зданий с их применением.

Проектирование сейсмоизолированных зданий и сооружений предъявляет повышенные требования к точности и обоснованности всех этапов инженерного анализа. Ключевое значение приобретает корректный выбор расчетных моделей сейсмического воздействия, включая спектральные характеристики, продолжительность колебаний грунта на площадке, а также сценарии возможных землетрясений. Во многих случаях интенсивность землетрясений оказывается фактически намного выше, чем расчетная интенсивность, определяемая в рамках проектирования объекта. Не менее важен научно обоснованный выбор математических моделей сейсмоизолирующих устройств, учитывающих их фактическое поведение при знакопеременных циклических нагрузках, а также применение адекватных численных методов расчета и инженерных методик упрощенного анализа, обеспечивающих достоверный расчет конструкций на сейсмические воздействия. Вследствие низкой жесткости сейсмоизолирующего слоя, горизонтальные перемещения конструктивной системы здания, расположенной выше систем сейсмоизоляции, могут при сильных землетрясениях достигать десятков сантиметров. Это обстоятельство делает критически важным контроль не только усилий в элементах конструктивной системы здания, но и предельных перемещений.

Широкое внедрение систем сейсмоизоляции должно сопровождаться обязательным научно-техническим сопровождением проектирования и строительства здания. Это позволяет минимизировать риски отступлений от нормативных требований и проектных параметров, гарантирует соблюдение технологии изготовления и монтажа сейсмоизолирующих устройств и, как следствие, обеспечивает требуемую эффективность системы сейсмозащиты, надежность и механическую безопасность здания в целом.

Для контроля безопасности и возможности использования зданий и сооружений необходимо регулярное техническое обслуживание и мониторинг состояния сейсмоизолирующих устройств. Система динамического мониторинга позволяет своевременно предупреждать возникновение чрезвычайных ситуаций, оценивать техническое состояние зданий и сооружений по изменению их динамических параметров в результате сейсмических воздействий, собирать и анализировать данные по поведению здания в условиях реальных сейсмических воздействий. При этом результаты динамического мониторинга позволяют оперативно принимать решение о механической безопасности здания на основе данных мониторинга, накопленных в прошлом, а не просто на основе поверхностной визуальной инспекции.

Применение систем сейсмоизоляции продемонстрировало высокую эффективность на ряде объектов различного назначения и конструктивного исполнения. Этот факт подтверждается данными сейсмометрических наблюдений, зафиксированными во время последних разрушительных землетрясений. Это свидетельствует о целесообразности более широкого внедрения сейсмоизолирующих систем, особенно в районах с повышенной сейсмической активностью.

Список литературы/References

1. *Boroschek R., Retamales R., Aguilar A.* Seismic response of isolated structures subjected to Mw 8.8 Chile earthquake of February 27, 2010. In: Proceedings the International Symposium for CISMID 25th Anniversary, Paper No. M-2, Peru; 2012. Available at: https://boroschek.com/wp-content/uploads/2013/01/2012_cismid-boroschek.pdf.
2. *Moroni M., Sarrazin M., Boroschek R.* Experiments on a base-isolated building in Santiago, Chile. *Engineering Structures*. 1998;20(8):720–725. [https://doi.org/10.1016/s0141-0296\(97\)00086-2](https://doi.org/10.1016/s0141-0296(97)00086-2).
3. *Eriksen K.B., Mohammed M.S., Coria C.B.* Seismic Isolation in North and South America. In: 2018 NZSEE Conference, New Zealand; 2018. Available at: https://dis-inc.com/pdf_files/DIS%20Seismic%20Isolation%20in%20North%20and%20South%20America.pdf.
4. Learning from Earthquakes. The Mw 7.1 Darfield (Canterbury), New Zealand Earthquake of September 4, 2010. EERI Special Earthquake Report – November 2010. Oakland: Earthquake Engineering Research Institute; 2010.
5. Ken Elwood (Group Leader), Roberto Leon, Arturo Schultz, Henri Gavin, Jose Restrepo, Amit Kanvinde, G. Kumar Venayagamoorthy with input from several New Zealand colleagues: D. Bull; D. Brunsdon; D. Hopkins; J. Ingham; W. Kam; S. Oliver; S. Pampanin; E. Seville. NZ Structures Group. Japan and NZ RAPID and Research Needs Workshop February 9 and 10, 2012.
6. *Gavin H.P., Wilkinson G.* Preliminary Observations of the 2010 Darfield Earthquake on the Base Isolated Christchurch Women's Hospital. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2010;43(4):360–367. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.43.4.360-367>.
7. *Kuang A., Sridhar A., Garven J., Gutschmidt S., Rodgers G.W., Chase J.G., Gavin H.P., Nigbor R.L., MacRae G.A.* Christchurch Women's Hospital: Performance Analysis of the Base-Isolation System during the Series of Canterbury Earthquakes 2011–2012. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016;30(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000846](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000846).
8. By Courtesy of Tohoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.
9. *liba M., Kashima T., Morita K., Azuhata T., Inoue N., Tanuma T.* Behavior of seismically isolated buildings based on observed motion records during the 2011 Great East Japan earthquake. In: 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, commemorating JSSI 20th Anniversary, 24–27 September 2013. Sendai Japan; 2013.
10. *Saito T.* Behavior of response controlled and seismically isolated buildings during severe earthquakes in Japan. *Energia, Ambiente e Innovazione* [internet]. 2015;(5). Available at: <https://www.eai.enea.it/archivio/n-5-settembre-ottobre-2015/behavior-of-response-controlled-and-seismically-isolated-buildings-during-severe-earthquakes-in-japan.html>.
11. Strong Motion Records at Nuclear Power Plants in the CD-ROM provided by Japan Association for Earthquake Engineering, No.10, 2011.
12. *Kashima T., Koyama S., Okawa I., liba M.* Strong Motion Records in Buildings from the 2011 Great East Japan Earthquake. In: Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE); 2012. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1768.pdf.
13. *Takayama M., Morita K.* Observed response of seismically isolated buildings during the 2016 Kumamoto earthquake. In: 17th U.S.-Japan-New Zealand Workshop on the Improvement of Structural Engineering and Resilience. New Zealand; 2018. Available at: <https://atcouncil.org/docman/atc-15-16-papers/193-p5-01-takayama/file>.

14. *Morita K., Takayama M.* Behavior of Seismically Isolated Buildings during the 2016 Kumamoto Earthquakes. Available at: <https://studyres.com/doc/14250162/behavior-of-seismically-isolated-buildings-during-the-2016>.
15. Strong Motion Seismograph Network (K-NET, KiK-net) [internet]. Available at: http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/docs/overview_kyoshin_index_en.html.
16. *Morita K., Takayama M.* Lessons learned from the 2016 Kumamoto earthquake: Building damages and behavior of seismically isolated buildings. AIP Conference Proceedings. 2017;1892(1):020007. <https://doi.org/10.1063/1.5005638>.
17. Condominium Management Companies Association [internet]. Available at: <http://www.kanrikyo.or.jp/news/data/160614kyusyuu2.pdf>. (In Japanese).
18. AFAD. Disaster and emergency management authority [internet]. Available at: <https://deprem.afad.gov.tr/stations>.
19. *Qu Z., Wang F., Chen X., Wang X., Zhou Z.* Rapid report of seismic damage to hospitals in the 2023 Turkey earthquake sequences. Earthquake Research Advances. 2023;3(4):100234. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2023.100234>.
20. The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, earthquake sequence. USGS – Geologic Hazards Science Center and Collaborators [internet]. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/storymap/index-turkey2023.html>.
21. *Erdik M., Tuzun C., Ulker O.* Evaluation of Seismic Isolation Applications of Health Care Facilities in turkey. In: Proceedings of the 14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures San Diego (CA), USA; 2015.
22. *Akkar S., Azak T., Çan T., Çeken U., Demircioğlu Tümsa M.B., Duman T.Y., Erdik M., et al.* Evolution of seismic hazard Maps in Turkey. Bulletin of Earthquake Engineering. 2018;16(8):3197–3228. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0349-1>.
23. Middle East Technical University. Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcik Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes. Report NO: METU/EERC 2023-01. Earthquake Engineering Research Center; 2023. Available at: <https://avesis.tedu.edu.tr/yayin/06737146-9296-4ee9-9e8b-e47459a89d04/preliminary-reconnaissance-report-on-february-6-2023-kahramanmaras-pazarcik-mw-7-7-and-elbistan-mw-7-6-earthquakes>.
24. *Erdik M., Ülker Ö., Şadan B., Tüzün C.* Seismic isolation code developments and significant applications in Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2018;(115):413–437. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.009>.
25. *Dilsiz A., Gunay S., Mosalam K., Miranda E., Arteta C., Sezen H., Fischer E., et al.* StEER-EERI: 2023 Mw 7.8 Kahramanmaras, Türkiye Earthquake Sequence Joint Preliminary Virtual Reconnaissance Report (PVRR). ETH Zurich [internet]. Available at: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/645478>.
26. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Resmî Gazete [internet]. 2018; 18 Mart. Available at: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>. (In Turkey).
27. Malatya Battalgazi state hospital. TİS [internet]. Available at: <https://www.tis.com.tr/en/projeler/malatya-battalgazi-state-hospital/> [2023].

Информация об авторах / Information about the authors

Ильнур Разлеви́ч Гизятуллин , заведующий сектором расчета сооружений лаборатории сейсмостойких сооружений и инновационных методов сейсмозащиты (ЛССИМС) центра исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», академический советник РИА, Москва

e-mail: ilnur@seismic-research.ru

Ilnur R. Giziatullin , Sectotal Head, Sector for Calculation of Structures, Laboratory of Earthquake-Resistant Structures and Innovative Methods of Earthquake Protection, Center for Research of Earthquake Resistance of Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Academic Advisor of the Russian Academy of Engineering, Moscow

e-mail: ilnur@seismic-research.ru

Алсу Ильсуровна Фаттахова, канд. техн. наук, старший научный сотрудник сектора сейсмостойкости конструкций ЛССИМС ЦИСС, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alsu I. Fattakhova, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Sector for Calculation of Structures, Laboratory of Earthquake-Resistant Structures and Innovative Methods of Earthquake Protection, Center for Research of Earthquake Resistance of Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Инна Артемовна Петросян, младший научный сотрудник сектора расчета сооружений ЛССИМС ЦИСС, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Inna A. Petrosyan, Junior Researcher, Sector for Calculation of Structures, Laboratory of Earthquake-Resistant Structures and Innovative Methods of Earthquake Protection, Center for Research of Earthquake Resistance of Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Татьяна Евгеньевна Бутикова, техник сектора расчета сооружений ЛССИМС ЦИСС, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Tatiana E. Butikova, Technician, Sector for Calculation of Structures, Laboratory of Earthquake-Resistant Structures and Innovative Methods of Earthquake Protection, Center for Research of Earthquake Resistance of Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author