

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 2 / 2024, Vol. 11, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS224.pdf>

DOI: 10.15862/09SATS224 (<https://doi.org/10.15862/09SATS224>)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

Анализ повреждений мостовых сооружений от воздействия сейсмической нагрузки

¹Нурғалиева А.Р., ^{1, 2, 3}Овчинников И.Г.

¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия

²ФГАОУ ВО «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия

³ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Нурғалиева Алина Рустамовна, e-mail: Nurgalievaalina140201@gmail.com

Аннотация. Рассматриваются проблемы сейсмической безопасности транспортной инфраструктуры в мире и особенно в Российской Федерации. Вопросы сейсмостойкого проектирования и строительства транспортных сооружений обсуждаются на фоне недавних катастрофических событий, подчеркивая необходимость улучшения нормативной базы и адаптации к реальным сейсмическим условиям. На основе исследования литературных источников и анализа данных о прошлых сейсмических бедствиях, в статье делается акцент на необходимости комплексного подхода к обеспечению безопасности транспортных сооружений. Приведен критический обзор российской и зарубежной научной литературы, отмечен опыт некоторых стран, содержащих сейсмоактивные зоны, в борьбе за безопасность транспортной инфраструктуры. Особое внимание уделяется анализу повреждений мостов после землетрясений и предложенным методам оценки геодинамической безопасности. В целом обращается внимание на актуальность и важность исследований в области сейсмостойкого проектирования мостов и на их значимость для обеспечения безопасности транспортной инфраструктуры в условиях сейсмической

активности. Одним из вызовов, стоящих перед разработчиками нормативной документации, является ограниченность описательной и расчетной базы для новых систем сейсмозащиты, также подчёркивается необходимость финансирования исследований в этой области. В заключение указывается, что повреждения и разрушения мостовых сооружений являются результатом взаимодействия нескольких факторов, включая непредсказуемость сейсмических явлений, несовершенство процесса проектирования и строительства, кадровый дефицит и неправильную эксплуатацию. Отмечается, что анализ и систематизация информации о повреждениях мостовых сооружений, вызванных сейсмической активностью, играют ключевую роль в разработке методов их предотвращения и снижения последствий аварийных ситуаций. Поставлен вопрос о развитии сейсмоустойчивого мостостроения в России.

Ключевые слова: мосты; транспортные сооружения; сейсмозащита; повреждения; землетрясения; аварии мостовых сооружений; нормы сейсмозащиты; пример обрушения мостов

Damage analysis of bridge structures from seismic load effects

¹Alina R. Nurgalieva, ^{1, 2, 3}Igor G. Ovchinnikov

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

³Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

Corresponding author: Alina R. Nurgalieva, e-mail: Nurgalievaalina140201@gmail.com

Abstract. The problems of transport infrastructure seismic safety in the world and especially in the Russian Federation are considered. The aseismic design issues and transport structures construction are discussed against the background of recent catastrophic events, emphasising the need to improve the regulatory framework and adaptation to real seismic conditions. Based on a literature sources study and data analysis on past seismic disasters, the paper focuses on the need for an integrated approach to ensuring the transport structures safety. A critical review of Russian and foreign scientific literature is given, and the experience of some countries containing seismically active zones in the struggle for the safety of transport infrastructure is noted. Special attention is given to the bridge's damage analysis after earthquakes and the proposed methods for assessing geodynamic safety. In general, attention is drawn to the relevance and importance of research in the field of earthquake-resistant bridge design and its relevance to the transport

infrastructure safety under seismic activity. One of the challenges facing regulatory developers is the limited descriptive and design basis for new seismic protection systems, and the need to fund research in this area is also emphasised. Finally, it is pointed out that damage and failure of bridge structures is the result of the interaction of several factors, including unpredictability of seismic events, imperfect design and construction processes, staffing shortages, and improper operation. It is noted that the information analysis and systematisation on bridge structures damage caused by seismic activity play a key role in the development of methods to prevent them and reduce the consequences of accidents. The development question of seismic-resistant bridge construction in Russia is raised.

Keywords: bridges; transport structures; seismic protection; damage; earthquakes; bridge accidents; seismic protection standards; example of bridge collapse

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Согласно недавно опубликованному гуманитарным информационным порталом отчету¹, землетрясения стали самой смертоносной стихией за последние 20 лет. Землетрясение в Турции от 6 февраля 2023 года унесло жизни более 50 тысяч человек и встало на первую строчку экономических потерь за 2023 год. Несмотря на усовершенствование и улучшение сейсмической защиты сооружений транспортного строительства, произошедшие за последние годы землетрясения нанесли очевидный ущерб.

Это связано в том числе с явлением «индуцированной сейсмичности», наблюдаемым как в России (в Забайкалье, в районах Северного Кавказа, районе о. Сахалин, Камчатке, Якутии [1]), так и во всем мире [2–4]. Если говорить о картах общего сейсмического районирования, то при сравнении даже карт «А» заметно, что зоны «краснеют». Однако, за последние 10 лет в сейсмически активных регионах Российской Федерации зафиксировано 1 172 ощутимых землетрясения и 8 чрезвычайных ситуаций, вызванных сейсмической активностью. Общая сумма материального ущерба составила 3,3 миллиарда рублей.² Сейчас в России имеет место период так называемого «сейсмического затишья», но это возможный предвестник будущих сильных землетрясений на территории России.

Касательно Российской Федерации стихийными бедствиями, оказывающими значительное влияние на транспортную инфраструктуру, являются [5]:

1. Естественные угрозы, ассоциированные с холодным и снежным сезоном (распространены по всей стране).
2. Проливные дожди, наводнения.
3. Как самостоятельная угроза или как угроза, возникшая вследствие пункта 2 — оползни, селевые потоки.
4. Сильные ветры, шквалы.
5. Катастрофические виды природных опасностей (землетрясения, цунами, ураганы и др.). Им территория России подвержена слабо.

Разрушения транспортной инфраструктуры вызывают аварии и нарушения движения, что приводит к чрезвычайным ситуациям и порождает ряд социальных проблем. Настоящее общество крайне

¹ 2023 Disasters in numbers URL: <https://reliefweb.int/report/world/2023-disasters-numbers>.

² Бюллетень Счетной палаты Российской Федерации, 2023, № 6. Сейсмостойчивость.

зависимо от эффективности транспортных систем для повседневного передвижения людей и доставки грузов. Искусственные сооружения — мосты, тоннели, путепроводы и т. д., являются неотъемлемой частью социальной и экономической инфраструктуры, обладая высокой значимостью для регионального и государственного развития. Важность этих инженерных сооружений заключается не только в обеспечении мобильности и связности территорий, но и в значительных капиталовложениях, необходимых для их создания и поддержания. В связи с этим необходимо придавать большое значение вопросам безопасности данных сооружений. Транспортные сооружения играют важную роль в оказании помощи и поддержки в чрезвычайных ситуациях. В период чрезвычайных происшествий (наводнений, оползней, землетрясений и т. д.) доступность транспортных маршрутов значительно снижается, что осложняет возможности спасательных операций и оказания помощи пострадавшим. Таким образом, мосты и путепроводы приобретают ключевое значение в обеспечении эффективности и оперативности спасательных мероприятий, а также в минимизации последствий для пострадавших.

1. Анализ состояния проблемы

1. Problem state analysis

Как это ни печально, но история разработки строительных норм и правил в сфере сейсмостойкого строительства в значительной мере определяется разрушительными землетрясениями, которые стимулировали развитие и усовершенствование строительных стандартов для обеспечения безопасности и снижения рисков при строительстве зданий и сооружений [6].

В последние годы российские нормы строительства в сейсмически активных районах претерпели изменения и были актуализированы, однако недостаточно адаптированы к реальной сейсмической обстановке в регионах и без учета международного опыта и рекомендаций. Именно этому вопросу посвящены статьи Е.Н. Курбацкого с сотрудниками [7–9].

Похожая проблема поднималась в статьях [10; 11], где, в частности, обсуждался подход к заданию исходных данных сейсмической нагрузки, которые очевидно являются отправной точкой проектирования, а также к выбору и проектированию фундамента. На примере Красноярского края критиковалось отсутствие базового микрорайонирования, несовершенство нормативной базы как на федеральном, так и на региональном уровне, недостаток внимания к разработке инновационных методов, в угоду традиционным методам, среди которых, согласно международному опыту и экспериментальной базе, имеются бесполезные [11]. Не стоит забывать

и про финансовый аспект. Строительство или усиление только зданий — это значительная статья затрат для региона, что же говорить о транспортной инфраструктуре? При этом согласно данным Бюллетеня счетной палаты по статье «Сейсмоустойчивость» от 2023 года, 43 региона из 73 (16 из которых имеют наивысшую степень сейсмической опасности) не получают финансовой поддержки от государства. В пример можно поставить Новосибирскую область, которая, согласно приложению А СП 14.13330.2018, расположена в сейсмически активной зоне, но отсутствует в Перечне субъектов Российской Федерации, расположенных в сейсмических районах Российской Федерации (приложение к Правилам предоставления и распределения субсидий из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации на софинансирование расходных обязательств субъектов Российской Федерации по сейсмоусилению объектов). Это является сдерживающим фактором на пути к субсидиям из федерального бюджета. Сахалинская область, по данным Счетной палаты РФ, уже пятый год не получает финансирования для сейсмоусиления зданий и сооружений из федерального бюджета.

Показателен пример работы с нормами в Японии — вынужденном лидере сейсмостойкого строительства. После одного из катастрофических землетрясений в 1995 году (Hyogo-ken Nanbu (Kobe)) нормы сейсмического проектирования были пересмотрены, и по всей стране были проведены работы по сейсмической модернизации. В итоге землетрясения, произошедшие 26 июля 2003 года (Miyagi-ken-hokubu) магнитудой 6,4, 25 сентября 2003 года (Tokachi-oki) магнитудой 8,0, 20 марта 2005 года (Fukuoka-ken Seiho-oki) магнитудой 7,0 и другие, не привели к значительным повреждениям, не говоря о разрушении мостовых сооружений [12]. Все это благодаря целой программе модернизации мостов с целью снижения сейсмической уязвимости, в основу которой лег документ «Техническое руководство по реконструкции и ремонту автомобильных мостов, пострадавших в результате землетрясения в Хиого-Кенанбу» (Guide Specifications for Reconstruction and Repair of Highway Bridges that suffered Damage due to the Hyogo-ken Nanbu Earthquake) от 1995 года. Постоянно производится анализ и аудит (Japanese government's Board of Audit) зданий и сооружений в районах, подверженных сильным рискам со стороны стихии.

В Соединенных Штатах произошла модернизация мостов и путепроводов в соответствии с таким же планом развития, после тщательного анализа последствий землетрясений. На протяжении более десяти лет, с 1950-х по 1960-е годы, активно осуществлялись масштабные программы расширения транспортной инфраструктуры в Центральной и Юго-Восточной части страны. Однако эти работы не всегда соблюдали сейсмические нормы проектирования, что привело к недостаточной

сейсмической прочности некоторых мостов.³ Поэтому уже в феврале 1971 года землетрясение в Сан-Фернандо привело к масштабным обрушениям мостов и эстакад (рис. 1).



Рисунок 1. Разрушенная эстакада, развязка между штатами, февраль 1971 года (источник: https://en.wikipedia.org/wiki/1971_San_Fernando_earthquake#/media/File:1971_San_Fernando_highway_overpass_collapse.jpg, автор фото: Reuben Kachadoorian)

Figure 1. Collapsed overpass, interstate interchange, February 1971 (source: https://en.wikipedia.org/wiki/1971_San_Fernando_earthquake#/media/File:1971_San_Fernando_highway_overpass_collapse.jpg, photo by Reuben Kachadoorian)

В результате проведенных обследований и расследований причин обрушений Министерством транспорта Калифорнии (Caltrans) была разработана программа модернизации, направленная на выявление и исправление дефектов конструкций, а также на их реконструкцию, в соответствии с которой и было выполнено большинство сейсмоусиливающих мероприятий на объектах транспортной инфраструктуры того времени. Такой комплекс существенно сократил уровень ущерба и повреждений, наносимых мостам в последующих сейсмических событиях, включая землетрясения в Лома-Приете в 1989 году и в Нортридже в 1994 году [13]. Недавно опубликованное исследование [14], опирающееся на длительный период наблюдений и измерений, говорит о высокой вероятности землетрясения в Калифорнии в районе Разлома Сан-Андреас в ближайшее время.

Проблема повреждений мостов от сейсмического воздействия напрямую или косвенно, в результате прогрессирующего разрушения от триггерной нагрузки, глубже, чем просто анализ имеющихся примеров. Она затрагивает самые начальные аспекты проектирования сооружения — нормирования и конструктивных мер строительства.

³ Damage of Bridge Structures during Recent Earthquakes and the Effectiveness of Seismic Retrofit URL: https://www.academia.edu/4311714/Damage_of_Bridge_Structures_during_Recent_Earthquakes.

Одни из первых книг, написанных с целью представления общих сведений о землетрясениях, данных о повреждениях инженерных сооружений во время сильных сейсмических событий, принадлежат Г.Н. Карцивадзе [15; 16]. В них описаны как повреждения мостов, тоннелей, путепроводов, так и методы их предотвращения в будущем.

В последние годы внимание к проблеме аварийности мостовых сооружений возросло. Примером может стать цикл статей [17–20] полностью посвященный анализу аварий и разрушений мостовых сооружений. Названо более 10 возможных причин для различных ситуаций и конструкций мостов, среди которых есть и сейсмические нагрузки. Статья [21] описывает проблему прогрессирующего обрушения мостов, подчеркивая влияние сейсмической нагрузки.

Анализу именно повреждений мостовых сооружений после землетрясений посвящена статья [22], которая подробно описывает степени повреждений после землетрясений различной балльности, приводит примеры, а также обосновывает применение тех или иных конструктивных схем для предотвращения определенных дефектов. Похожие вопросы рассмотрены и в работе [23].

Интересный подход для анализа приведен в работе [24]. Предложена оценка мостов по категориям геодинамической безопасности, с помощью которой будет возможно оценить безопасность мостового сооружения.

Исследования, связанные именно с анализом последствий от сейсмической нагрузки на мосты, в основном, принадлежат зарубежным авторам. Это во многом связано с географией землетрясений, значительная часть которых происходит за пределами РФ. В работе [25] причины и механизмы разрушений подразделяются на 2 большие группы: вызванные человеком и вызванные природными явлениями. В исследовании [26] на примерах некоторых балочных мостов исследуются причины повреждений после масштабных землетрясений.

Среди иностранной литературы особую ценность имеет книга [27] шведского автора. В ней представлено изучение 20 случаев разрушения мостов, которые имели место в течение последних двух веков. Подробно рассмотрены особенности каждого случая, среди причин выделены как стандартные, так и новые, не указанные в отчетах. Подробная для своего времени работа [28] имеет описание повреждений мостов от землетрясений начиная с 1891 года.

Можно также сослаться на ряд работ зарубежных исследователей по теме⁴ [29–31].

⁴ Alim, H., Reliability based seismic performance analysis of retrofitted concrete bridge bent. URL: https://www.researchgate.net/publication/273573779_RELIABILITY_BASED_SEISMIC_PERFORMANCE_ANALYSIS_OF_RETROFITTED_CONCRETE_BRIDGE_BENT.

2. Некоторые примеры повреждений автомобильных мостов при воздействии сейсмической нагрузки

2. Some highway bridges damage examples when subjected to seismic loading

Рассмотрим повреждения нескольких мостов, вызванных резонансным землетрясением 12 мая 2008 года в Китае в провинции Сычуань. Напомним, что землетрясение в 8,0 баллов произошло из-за столкновения Индийско-Австралийской и Евразийской плит вдоль разлома Лунмэньшань, в результате погибло около 90 тысяч человек, разрушены 80 % всех зданий провинции, а также 1 600 объектов транспортной инфраструктуры были значительно повреждены или разрушены.⁵ Стихийное бедствие вызвало широкий общественный резонанс на фоне некачественного строительства объектов социального значения.

В том землетрясении в первые же минуты пострадал мост Мяозипин (Miaoziping) (рис. 2). Сооружение является типичным для строительства в Китае в те годы: высокие опоры, значительные пролеты, предварительно напряженные элементы. Главный мост представляет собой трехпролетную неразрезную балку по схеме 125 + 220 + 125 м, элементы моста — Т-образные железобетонные балки коробчатого сечения. При строительстве моста были предусмотрены эластомерные подшипники как часть сейсмозащитного механизма.



*Рисунок 2. Сброс пролета (источник:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMG_2635_-_Bridge_near_Zipingpu_Dam.jpg,
автор фото: Ken Marshall)*

Figure 2. Span collapse (source: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMG_2635_-_Bridge_near_Zipingpu_Dam.jpg, photo by Ken Marshall)

⁵ Pletcher, Kenneth and Rafferty, John P. "Sichuan earthquake of 2008". Encyclopedia Britannica, 19 Dec. 2023, <https://www.britannica.com/event/Sichuan-earthquake-of-2008>.

В результате произошел сброс пролета моста, верхняя часть опор обрушившегося пролета деформирована, блок боковой стенки сдвинут, отмечено горизонтальное перемещение эластомерных подшипников и, как следствие, вертикальное смещение пролетов составило 0,3 м [32–33]. Сдвиг боковых блоков привел к смещению пролетов в поперечном направлении моста.

Пролеты главного моста, устроенные на сплошных опорах, тоже пострадали: отмечены трещины в первой трети концевых пролетов и трещины в середине центрального пролета. Характерные разрушения отмечены и на оголовках опор моста: нитевидные трещины на подферменниках, отдельные значительные трещины в теле опоры (рис. 3). Разница в высотных отметках соседних опор (сквозные опоры) после землетрясения составила от 0,69 м до 1,05 м.⁶

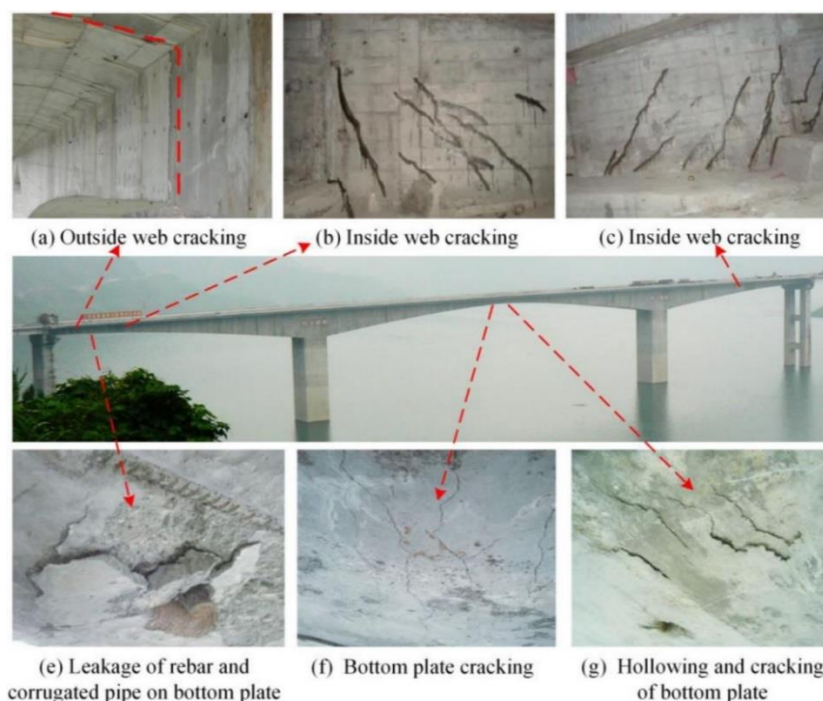


Рисунок 3. Повреждения пролетов главного моста (источник: [33])

Figure 3. Damage to main bridge spans (source: [33])

Мост похожей конструкции — мост Байхуа (Baihua Bridge), с интересной конструкцией изогнутого пролета был расположен прямо у подножья склона.

В результате землетрясения полностью обрушилось 5 пролетов, опоры были закручены, в местах соединения вертикальных и горизонтальных элементов опоры вырвана арматура [32; 33]. Также

⁶ China Earthquake Reconnaissance Report: Performance of Transportation Structures During the May 12, 2008, M7.9 Wenchuan Earthquake. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11029/003.cfm>.

разрушению способствовал обвал грунта, были отмечены выбоины на соседних пролетах от камней (рис. 4, 5).

Обрушение данного характера — это пример прогрессирующего разрушения. Триггерным моментом стала сейсмическая нагрузка. При этом разлом прошел почти по очертанию пролетов мостового сооружения. Конструкция не подлежала восстановлению, поэтому было принято решение взорвать мост, сейчас в этом месте расположено другое сооружение.

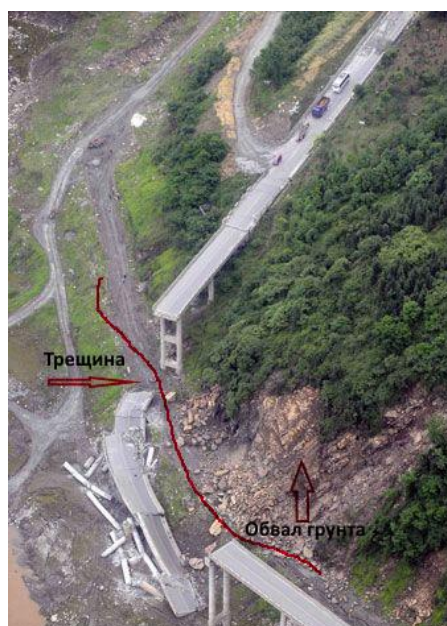


Рисунок 4. Обрушение моста [32]

Figure 4. Bridge collapse [32]



Рисунок 5. Вид опор обрушившихся пролетов [32]

Figure 5. View of the collapsed span supports [32]

Два пролета железобетонного арочного моста (Xiaoyudong bridge) под воздействием значительной продольной нагрузки обрушились, а два прогнулись (рис. 6). Отмечены повреждения береговых опор, однако фундаменты и промежуточные опоры почти не пострадали [33].

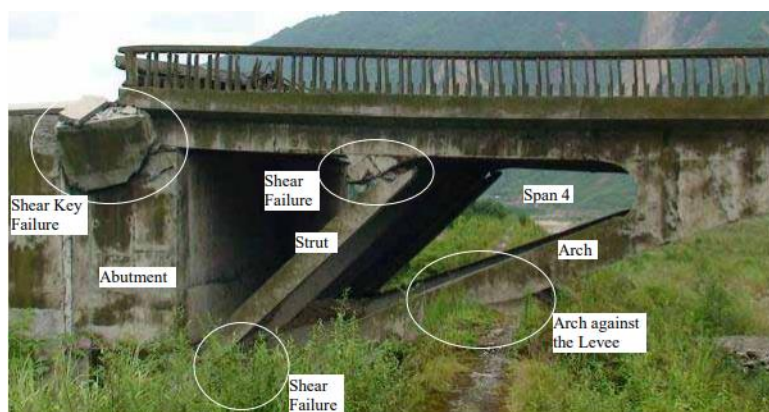


Рисунок 6. Вид на мост Xiaoyudong bridge после землетрясения 2008 года, Китай (источник: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11029/003.cfm>, фото: National Technical Information Service)

Figure 6. View of Xiaoyudong bridge after the earthquake in 2008, China (source: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11029/003.cfm>, photo: National Technical Information Service).

Другое землетрясение, произошедшее 14 ноября 2016 года в Новой Зеландии общей магнитудой 7,8 привело к повреждениям 904 мостов, главных магистралей и шоссе, отрезав путь к городу Кайкоура, местным жителям пришлось идти пешком за помощью. В том числе пострадал мост через реку Вайау (Waiaua River Bridge). Мост имеет 33 пролета, массивные опоры со столбчатой надстройкой, балочную конструкцию [34].

При обследовании отмечены трещины на устоях, деформации опор, искривление пролетов в поперечном направлении, трещины в насыпи, коробления у основания пирса (рис. 7). Значительная поперечная нагрузка могла стать причиной подвижки пролетов, но из-за массивных промежуточных опор повреждения не носили критического характера [34].



Рисунок 7. Искривление пролетов моста через реку Вайау [34]

Figure 7. Deformation of the bridge spans over the Waiaua River [34]

Повреждения почти всех мостов во время этого и предыдущего явления 4 сентября 2010 году (магнитудой 7,1) характеризовались так: трещины вдоль промежуточных опор, ротации пролетов, наклон столбчатых опор. Это связано с особенностями почв Новой Зеландии, мосты возводились на илистых грунтах [35].

17 января 1995 года в Японии в городе Кобе произошло землетрясение, которому было присвоено максимальное значение по шкале JMA (Great Hanshin Earthquake). При этом в той или иной степени было повреждено 320 мостов. Самым известным примером является обрушение эстакады Хансин — Hanshin Expressway bridge (рис. 8). Сооружение, состоящее из 18 пролетов, опрокинулось в первые секунды землетрясения. Опоры круглого сечения диаметром 3,1 м буквально рассыпались, а значительная поперечная нагрузка на сооружение повалила пролеты в сторону. В данном случае виной стали неграмотное проектирование и особенности почвы портового города. В работе [37] приведено описание эксперимента, воспроизводящего работу двух соседних опор, одна из которых осталась неповрежденной, а другая полностью разрушилась. Авторы отмечают значительное увеличение момента в опоре при дополнительном продольном армировании.



Рисунок 8. Обрушение эстакады Хансин [36]

Figure 8. Collapse of the Hanxing overpass [36]

Также в журнале Министерства транспорта США (United States Department of Transportation) [38] были отмечены характерные повреждения многих мостов при землетрясении: значительные повреждения верхних частей опор мостов и, как следствие, смещение пролетов, смещения и отрыв фундаментов опор из-за разжижения почв (рис. 9).



Рисунок 9. Смещение пролета моста в результате повреждения опорной части [38]

Figure 9. Bridge span displacement as a result of damage to the bridge bearing [38]

27 февраля 2010 года у побережья Чили произошло землетрясение магнитудой 8,8, которое повлекло за собой повреждение более 400 тысяч зданий и нескольких десятков мостов.⁷

Пролеты путепровода в регионе Мауле (Avenida Chada Acceso Sur Overpass) во время землетрясения значительно сместились и повернулись в плане (рис. 10). Поперечное смещение между верхом пролетной конструкции и опорной частью составляло от 640 до 780 мм, зазор между пролетом и устоем составляло около 90 мм. При этом пролет с силой ударился об устой, из-за чего тело устоя было разрушено. В основаниях опор круглого сечения образовались продольные трещины, от сильной тряски в местах сопряжения опоры с фундаментом образовался зазор. Во время обследований было отмечено вращение моста в плоскости, в результате образовались трещины по всему дорожному полотну.⁸

⁷ Rafferty, John P. and Pallardy, Richard. "Chile earthquake of 2010". Encyclopedia Britannica, 20 Feb. 2024, URL: <https://www.britannica.com/event/Chile-earthquake-of-2010>.

⁸ Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile: Chapter 4. structural performance of highway bridges URL: Chapter — Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile, March 2011 — FHWA-HRT-11-030 (dot.gov).



Рисунок 10. Повреждение устоя и пролета путепровода в Чили (источник: Rafferty, John P. and Pallardy, Richard. «Chile earthquake of 2010». Encyclopedia Britannica, 20 Feb. 2024, URL: <https://www.britannica.com/event/Chile-earthquake-of-2010>, фото: National Technical Information Service)

Figure 10. Damage to the bridge abutment and span of an overpass in Chile (source: Rafferty, John P. and Pallardy, Richard. «Chile earthquake of 2010». Encyclopedia Britannica, 20 Feb. 2024, URL: <https://www.britannica.com/event/Chile-earthquake-of-2010>, photo: National Technical Information Service)

В этом землетрясении пострадали и металлические мосты балочной конструкции, например, мост в городе Арауко (Tubul Bridge). Шесть пролетов моста обрушились сразу, а два последних во время афтершоков, опоры наклонились, фундаменты опор обнажились. Мост сместился почти полностью в сторону северной береговой опоры, в результате крайний пролет оказался «вмят» в устой (рис. 11, 12) [39]. Причиной могло служить разжижение грунта, а также тот факт, что глубина заложения крайних опор была всего 0,38 м, также повлияла ширина деформационного шва.



Рисунок 11. Обрушение моста в городе Арауко, Чили [39]

Figure 11. Bridge collapse in the city of Arauco, Chile [39]



Рисунок 12. Вид опоры моста в городе Арауко в Чили после землетрясения
(источник: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/004.cfm#:~:text=The%20Tubul%20bridge%20is%20an,diaphragm%20and%20the%20wall%20pier>, фото: National Technical Information Service)

Figure 12. View of a bridge bearing in the city of Arauco, Chile after the earthquake
(source: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/004.cfm#:~:text=The%20Tubul%20bridge%20is%20an,diaphragm%20and%20the%20wall%20pier>, photo: National Technical Information Service)

18 сентября 2022 года к северу от города Тайдун, Тайвань, произошло землетрясение магнитудой 6,9. Пострадало более десятка мостов, но при этом почти не был нанесен ущерб зданиям.

Полностью обрушились 2 моста вблизи разлома. Пролеты моста Гаоляо (Gaoliao Bridge) перевернулись при падении (рис. 13). На мост воздействовала большая поперечная сила, которую не выдержало столь протяженное строение. Возможная причина обрушения в том, что пролеты являлись жесткой системой, а колонны без достаточного армирования быстро потеряли устойчивость, поэтому сооружение буквально опрокинулось. При этом отмечено, что пролеты и даже дорожное полотно почти не пострадали.⁹

Структурные особенности транспортных сооружений играют ключевую роль в обеспечении их устойчивости к сейсмическим воздействиям. Конструкции, подверженные сейсмическим нагрузкам, должны быть спроектированы и построены с учетом региональных геологических и сейсмических условий.

⁹ Preliminary virtual reconnaissance report Lugu, Taiwan September 18, 2022, Erica Fischer, Oregon State University
URL: <https://www.designsafe-ci.org/data/browser/public/designsafe.storage.published/PRJ-3707/#details-3223575335598625261-242ac118-0001-012>.



Рисунок 13. Общий вид моста Gaoliao Bridge в Тайване (источник: Кадр из видеоролика: https://edition.cnn.com/2022/09/18/asia/taiwan-earthquake-tsunami-warnings-intl/index.html?utm_source=twCNN&utm_content=2022-09-20T01%3A01%3A03&utm_medium=social&utm_term=video, CNN)

Figure 13. General view of the Gaoliao Bridge in Taiwan (source: Video frame: https://edition.cnn.com/2022/09/18/asia/taiwan-earthquake-tsunami-warnings-intl/index.html?utm_source=twCNN&utm_content=2022-09-20T01%3A01%3A03&utm_medium=social&utm_term=video CNN)

В большинстве случаев балочные мосты, как показывает практика, имеют характерные повреждения при сейсмической нагрузке более 8 баллов. Сюда относятся: смещение пролетных конструкций относительно опор или опорных площадок, падение с опор (концевое или поперечное, вдоль или поперек моста), повреждение оголовков и опорных элементов, смещение (скольжение) опор в сторону пролета и их наклон, разрушение промежуточных опор, опрокидывание или смещение вдоль деформационного шва. Балочные мосты подвергаются значительному продольному воздействию при сейсмической нагрузке.

Повреждения арочных мостов обычно характеризуются следующим: трещинами и прогибами в арках без затяжки, повреждениями щековых стен моста, повреждениями замковых шарниров, смещением опор. Уязвимыми участками висячих мостов являются анкерные устои, пилоны, пролеты.

3. Тенденции и векторы развития сейсмостойкого строительства мостов и путепроводов

3. Trends and development vectors of earthquake-resistant construction of bridges and overpasses

Мостостроение не стоит на месте, все больше сооружений строится в сейсмически опасных районах, например, Крымский мост, Ороктойский мост, улучшаются методы расчета, контроль работ. Национальный

стандарт «Безопасность автомобильных дорог» дал новый виток развития качественных дорог, мостов, переправ. Результатом работы стали новые государственные стандарты, которые с одной стороны дают свободу заказчику, так как уточняют и раскрывают некоторые моменты технических документов, с другой ограничивают высоким качеством и безопасностью производства работ. Это то направление, которое заслуживает развития.

Одной из существующих проблем стандартов является ограниченность описательной и расчетной базы для новых систем сейсмозащиты. Применение инновационного материала или конструкции влечет за собой необходимость индивидуального расчета, но при этом возникает вопрос: достаточны ли экспериментальные исследования? Здесь также встает вопрос финансирования, так как строительство транспортной инфраструктуры — это очень дорогое удовольствие.

Зарубежные исследователи находят новые точки изучения работы конструкции на всех этапах жизненного цикла. Недавнее исследование [40] предлагает инновационную методологию оценки сейсмической уязвимости мостов на основе анализа обрушений, в основе лежит методология документа FEMA¹⁰, включающая четыре этапа: разработка нелинейной модели сооружения для оценки обрушения; нелинейный анализ сооружения; оценка эффективности с использованием коэффициента обрушения; документирование. Авторы утверждают, что эта методология адаптивна для проектирования новых конструкций и для усиления существующих объектов.

Выводы

Conclusions

Анализ показывает, что повреждения и разрушения мостовых сооружений от сейсмических воздействий являются результатом действия совокупности факторов:

1. Непредсказуемость и уникальность сейсмического явления.

Практически все землетрясения уникальны, пока нет такой технологии, чтобы точно предугадать параметры землетрясения [41]. Методы оценки пока не совершенны, а новое явление тщательно изучается сейсмологами, геологами, инженерами. Произошедшее землетрясение становится частью математического моделирования конструкций, но сказать с уверенностью, что то или иное сооружение не получит никаких

¹⁰ FEMA-P695 (2009). FEMA P69: Quantification of Building Seismic Performance Factors. Prepared by the Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., USA.

повреждений в будущих испытаниях стихией нельзя, поэтому внедрение инновационных методов защиты сооружений, оценки их прочности всегда кстати.

2. Несовершенство процесса проектирования и конструирования.

Землетрясения являются своеобразными «полевыми испытаниями», которые всегда находят огрехи в конструкциях. Во многих случаях обрушению мостов способствовали неправильная информация о гидрогеологических условиях для данной конструкции, например, в прошлом было принято решение строительства на почве, склонной к разжижению без защитных мероприятий. Тщательная проработка проектной базы, учет мнения мирового сообщества в вопросах проектирования, качественная оценка повреждений, модернизация по результатам оценки могут способствовать улучшения безопасности конструкций. Из этого вывода вытекает вторая проблема, актуальная именно в России на сегодняшний день.

3. Кадровый голод мостовиков.

В Российской Федерации недостаток учебных учреждений, занимающихся подготовкой специалистов в дорожно-мостовой области. И это вопрос масштабный, требующий решения на высшем уровне. Сейчас применение новых мероприятий, например, по защите от динамических нагрузок, требует технического обоснования, отдельных конструктивных расчетов, с которыми сложно справиться рядовому инженеру без ориентации на «мостовую область», он должен быть исследователем в том числе [42]. Поэтому качественная подготовка кадров будет играть решающую роль в успешности сооружения. Но для этого надо иметь и высококвалифицированные кадры преподавателей в вузах, что затрудняется нищенским финансированием преподавательского корпуса в РФ.

4. Некачественное строительство, ошибки при производстве работ.

Даже самое лучшее проектное решение в процессе реализации может столкнуться с ненадлежащим выполнением. Во многом это связано с экономией и отказом подрядчиков использовать инновационные материалы и механизмы.

5. Неправильная эксплуатация, износ сооружений.

В 2018 году Россию в новостях называли «страной падающих мостов», потому что за год обрушилось 100 мостов.¹¹ Массовые аварии стали результатом отсутствия качественного ремонта, обследования и

¹¹ Обрушение мостов в российских регионах: в чем причины и как с этим борются — URL: <https://realty.ria.ru/20181212/1547845421.html>.

банальной старости мостов. Это проблема не только России, за рубежом существует такая же проблема, исторические части городов, где множество каменных и бетонных мостов особо подвержены повреждениям со стороны природных явлений. Остро стоит вопрос инвентаризации объектов, так как Минстрой не знает, сколько в России действительно сейсмонеустойчивых объектов, включая мосты.¹²

Анализ и систематизация информации о повреждениях и разрушениях инфраструктурных объектов, таких как мосты, вызванных сейсмической активностью, играют ключевую роль в выявлении причин подобных событий и разработке методов их предотвращения. Распространение полученных знаний среди специалистов, занимающихся проектированием, строительством и эксплуатацией транспортных сооружений, способствует сокращению числа аварийных ситуаций и снижению их последствий. Накопление всей информации в электронной базе данных обеспечит возможность осуществления разнообразных тематических запросов и анализа их результатов в соответствии с целями и задачами исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Цирель, С.В.** Взаимосвязи между сейсмической активностью в Кузбассе и ведением открытых горных работ / С.В. Цирель, А.А. Павлович // Записки Горного института. — 2012. — Т 198. — С. 174–179. — URL: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5938?setLocale=ru_RU. — EDN QZERTX. (дата обращения: 03.04.2024).
2. **Уломов, В.И.** К вопросу о планетарной сейсмической активизации / В.И. Уломов // ГеоРиск. — 2010. — № 3. — С. 4–8. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15488254>. — EDN NAYEET. (дата обращения: 03.04.2024).
3. **Rodkin, M.V.** Can induced seismicity decrease under a long strong anthropogenic excitation? / M.V. Rodkin, A.A. Lyubushin. — DOI <http://dx.doi.org/10.31031/NRS.2023.14.000840> // Novel Research in Sciences. — 2023. — Т 14. — № 3. — С. NRS.000840. — URL: <https://crimsonpublishers.com/nrs/pdf/NRS.000840.pdf>. (дата обращения: 03.04.2024).
4. **Doocy, S.** The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980-2009 and systematic literature review / S. Doocy, A. Daniels, C. Packer, A. Dick, T. D. Kirsch. — DOI <https://doi.org/10.1371/currents.dis.67bd14fe457f1db0b5433a8ee20fb833> // PLoS currents. — 2013. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23857161/>. (дата обращения: 03.04.2024).
5. **Petrova, E.** Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia / E. Petrova. — DOI <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020> // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2020. — Т 20. — № 7. — С. 1969–1983. — URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/20/1969/2020/>. (дата обращения: 03.04.2024).
6. **Перельмутер, А.В.** О концептуальных положениях норм проектирования сейсмостойкого строительства / А.В. Перельмутер, О.В. Кабанцев. — DOI <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684> // Вестник МГСУ. — 2020. — Т 15. — № 12. — С. 1673–1684. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44896389>. — EDN ZDDJBD. (дата обращения: 10.04.2024).

¹² Минстрой не знает, сколько в России сейсмонеустойчивых объектов — URL: <https://ach.gov.ru/news/minstroj-ne-znaet-skolko-v-rossii-sejsmoneustojchivyh-obektov-36302>.

7. Устаревшие положения норм Российской Федерации, регламентирующих строительство в сейсмических районах / Е.Н. Курбацкий, В.Л. Мондрус, Г.А. Емельянова [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-1-159-165> // Academia. Архитектура и строительство. — 2024. — № 1. — С. 159–165. — URL: <https://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/577>. — EDN DIMXBS. (дата обращения: 10.04.2024).
8. **Курбацкий, Е.Н.** Динамические коэффициенты или спектры реакций (ответов) сооружений на сейсмические воздействия? / Е.Н. Курбацкий, В.Л. Мондрус, Г.А. Емельянова [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-1-107-114> // Academia. Архитектура и строительство. — 2019. — № 1. — С. 107–114. — URL: <https://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/111>. — EDN UNIOAX. (дата обращения: 10.04.2024).
9. **Курбацкий, Е.Н.** К вопросу о корректном задании исходной сейсмической информации / Е.Н. Курбацкий, В.Л. Мондрус, Е.А. Пестрякова. — DOI <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-134-143> // Academia. Архитектура и строительство. — 2021. — № 1. — С. 134–143. — URL: <https://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/293>. — EDN JTJPPC. (дата обращения: 13.04.2024).
10. Некоторые проблемные вопросы нормирования и научного обеспечения сейсмобезопасности в Красноярском крае / Н.П. Абовский, В.Г. Сибгатулин, В.И. Палагушкин [и др.] // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2010. — № 4. — С. 31–34. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19140694>. — EDN QCWGJJ. (дата обращения: 13.04.2024).
11. Сейсмозащитные устройства: актуальные проблемы сейсмобезопасности: монография / Н.П. Абовский и др. — под ред. Н.П. Абовского. — М-во образования и науки Российской Федерации; Сибирский федеральный ун-т. — Красноярск: СФУ, 2013. — 97 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006593777>. (дата обращения: 17.04.2024).
12. **Kawashima, K.** The Damage of Highway Bridges in the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake and Its Impact on Japanese Seismic Design / K. Kawashima, S. Unjoh. — DOI <https://doi.org/10.1080/13632469708962376> // Journal of Earthquake Engineering. — 1997. — Т 1. — № 3. — С. 505–541. — URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13632469708962376>. (дата обращения: 13.04.2024).
13. **Chai, Y.H.** Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance / Y.H. Chai, M. Priestley, F. Seible // ACI Structural Journal. — 1991. — Т 88. — № 5. — С. 572–584. — URL: <https://trid.trb.org/view/359512>. (дата обращения: 13.04.2024).
14. Malagnini, L. Seismic Attenuation Monitoring of a Critically Stressed San Andreas Fault / L. Malagnini, T. Parsons. — DOI <https://doi.org/10.1029/2020GL089201> // Geophysical Research Letters. — 2020. — Т 47. — № 23. — С. e2020GL089201. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL089201>. (дата обращения: 13.04.2024).
15. **Карцивадзе, Г.Н.** Сейсмостойкость дорожных искусственных сооружений / Г.Н. Карцивадзе. — Москва: Транспорт, 1974. — 263 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007386284>. (дата обращения: 13.04.2024).
16. **Карцивадзе, Г.Н.** Повреждения дорожных искусственных сооружений при сильных землетрясениях / Г.Н. Карцивадзе. — Москва: Транспорт, 1969. — 57 с. — URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007386283>. (дата обращения: 13.04.2024).
17. **Майстренко, И.Ю.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 1 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/13TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 13TS417. — URL: <https://t-s.today/13TS417.html>. — EDN NRLEKT. (дата обращения: 15.04.2024).
18. **Овчинников, И.Г.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/14TS417> // Транспортные сооружения. — 2017. — Т 4. — № 4. — С. 14TS417. — URL: <https://t-s.today/14TS417.html>. — EDN YPUCTS. (дата обращения: 15.04.2024).
19. **Майстренко, И. Ю.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 3 / И.Ю. Майстренко, И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/08SATS118> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — С. 08SATS118. — URL: <https://t-s.today/08SATS118.html>. — EDN XNZIGL. (дата обращения: 15.04.2024).

20. **Овчинников, И.И.** Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 4 / И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, И.Г. Овчинников [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/05SATS118> // Транспортные сооружения. — 2018. — Т 5. — № 1. — С. 05SATS118. — URL: <https://t-s.today/05SATS118.html>. — EDN UPMKLI. (дата обращения: 15.04.2024).
21. **Караханян, В.Б.** Особенности прогрессирующего разрушения применительно к мостовым сооружениям / В.Б. Караханян, И.И. Овчинников, М.А. Баев [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.15862/12SATS220> // Транспортные сооружения. — 2020. — Т 7. — № 2. — С 12SATS220. — URL: <https://t-s.today/12SATS220.html>. — EDN EZNHZC. (дата обращения: 15.04.2024).
22. **Апсметов, М.Ч.** Анализ повреждений зданий и мостовых сооружений при сильных землетрясениях / М.Ч. Апсметов, Д.К. Мурзакматов, А.А. Приходько, А.А. Тогузтороев. — DOI <http://dx.doi.org/10.35803/1694-5298.2019.3.479-483> // Вестник КГУСТА. — 2019. — № 3. — С. 479–483. — URL: https://www.researchgate.net/publication/338939275_ANALYSIS_OF_DAMAGE_TO_BUILDINGS_AND_BRIDGE_CONSTRUCTIONS_AT_STRONG_EARTHQUAKES. (дата обращения: 15.04.2024).
23. **Нишионов, Н.А.** Особенности повреждения искусственных сооружений при землетрясениях / Н.А. Нишионов, Д.И. Солиев, О.А. Куйчиев // Scientific Progress. — 2021. — № 7. — С. 854–859. — URL: <https://cyberleninka.ru/journal/n/scientific-progress?i=1124508>. (дата обращения: 18.04.2024).
24. **Баранов, Т.М.** Оценка безопасности мостов при геодеформационных воздействиях / Т.М. Баранов // Интернет-журнал Науковедение. — 2013. — № 1. — С. 60TBH113. — URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn113.pdf>. — EDN PZZNHJ. (дата обращения: 18.04.2024).
25. **Choudhury, J.R.** Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms / J.R. Choudhury, A. Hasnat // IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, August 21–22, 2015, Dhaka, Bangladesh: 2015. — С. 26–34. — URL: <https://www.iabse-bd.org/session/k2.pdf>. (дата обращения: 18.04.2024).
26. **Xia, X.S.** Analysis of Bridge Earthquake Damage and Reasonable Aseismic Systems / X.S. Xia, X.C. Chen, X.Y. Li. — DOI <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.4782> // Advanced Materials Research. — 2012. — № 433-440. — С. 4782–4787. — URL: <https://www.scientific.net/AMR.433-440.4782>. (дата обращения: 18.04.2024).
27. **Åkesson, B.** Understanding Bridge Collapses / B. Åkesson. — DOI <https://doi.org/10.1201/9781482266108>. — Лондон: CRC Press, 2008. — 280 с. — URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482266108/understanding-bridge-collapses-bj%C3%B6rn-%C3%A5esson>. (дата обращения: 18.04.2024).
28. **Hobbs, Wm. H.** A Study of the Damage to Bridges during Earthquakes / Wm. H. Hobbs // The Journal of Geology. — 1908. — Т 16. — № 7. — С. 636–653. — URL: <https://www.jstor.org/stable/30061372>. (дата обращения: 18.04.2024).
29. **Kawashima, K.** Damage of Bridges during 2011 Great East Japan Earthquake / K. Kawashima. — DOI https://doi.org/10.5610/jaee.12.4_319 // Journal of Japan Association for Earthquake Engineering. — 2011. — Т 12. — № 4. — С. 319–338. — URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee/12/4/12_4_319/article. (дата обращения: 18.04.2024).
30. **Mackie, K.R.** Post-earthquake functionality of highway overpass bridges / K.R. Mackie, B. Stojadinović. — DOI <https://doi.org/10.1002/eqe.534> // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. — 2006. — Т 35. — № 1. — С. 77–93. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eqe.534>. (дата обращения: 18.04.2024).
31. **Huang, Y.** Analysis of Damage Mechanism of Heihe Bridge during the Maduo Earthquake / Y. Huang, M.C. Yin, J. He, L.W. Cai. — DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2476/1/012034> // Journal of Physics: Conference Series. — 2023. — Т 2476. — С. 12034. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2476/1/012034>. (дата обращения: 18.04.2024).
32. **Kawashima, K.** Damage of Bridges In 2008 Wenchuan, China Earthquake / K. Kawashima, Y. Takahashi, H. Ge, Z. Wu, J. Zhang. — DOI <https://doi.org/10.2208/jsceja.65.825> // Doboku Gakkai Ronbunshuu A. — 2009. — Т 65. — № 3. — С. 825–843. — URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsceja/65/3/65_3_825/article-char/ja/. (дата обращения: 18.04.2024).

33. **Tong, L.** Seismic cracking mechanism and control for pre-stressed concrete box girders of continuous rigid-frame bridges: Miaoziping bridge in Wenchuan earthquake as an example / L. Tong, R. Wang, D. Wang. — DOI <https://doi.org/10.1186/s43251-021-00040-z> // Advances in Bridge Engineering. — 2021. — Т 2. — № 1. — С. 17. — URL: <https://aben.springeropen.com/articles/10.1186/s43251-021-00040-z>. (дата обращения: 18.04.2024).
34. **Palermo, A.** Performance of road bridges during the 14 November 2016 Kaikōura Earthquake / A. Palermo, R. Liu, A. Rais, B. McHaffie [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.5459/bnzsee.50.2.253-270> // Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. — 2017. — Т 50. — № 2. — С. 253–270. — URL: <https://bulletin.nzsee.org.nz/index.php/bnzsee/article/view/80>. (дата обращения: 18.04.2024).
35. **Wotherspoon, L.** Performance of Bridges during the 2010 Darfield and 2011 Christchurch Earthquakes / L. Wotherspoon, A. Bradshaw, R. Green, C. Wood [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.6.950> // Seismological Research Letters. — 2011. — Т 82. — № 6. — С. 950–964. — URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/srl/article-abstract/82/6/950/143894/Performance-of-Bridges-during-the-2010-Darfield?redirectedFrom=fulltext>. (дата обращения: 18.04.2024).
36. **Esper, P.** Lessons from the Kobe earthquake / P. Esper, E. Tachibana. — DOI <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1998.015.01.11> // Engineering Geology Special Publications. — 1998. — Т 15. — С. 105–116. — URL: <https://www.lyellcollection.org/doi/abs/10.1144/GSL.ENG.1998.015.01.11>. (дата обращения: 20.04.2024).
37. **Gazetas, G.** The Collapse of the Hanshin Expressway (Fukae) Bridge, Kobe 1995: Soil-Foundation-Structure Interaction, Reconstruction, Seismic Isolation / G. Gazetas, I. Anastasopoulos, N. Gerolymos [и др.]. — DOI https://doi.org/10.1007/3-540-27438-3_7 // Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik / Под ред. Rackwitz, F. Берлин: Springer, 2006. — С. 93–120. — URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27438-3_7. (дата обращения: 20.04.2024).
38. **Cooper, J.D.** Lessons from the Kobe Quake / J.D. Cooper, I. Buckle // Public Roads. — 1995. — Т 59. — № 2. — URL: <https://highways.dot.gov/public-roads/autumn-1995/lessons-kobe-quake>. (дата обращения: 20.04.2024).
39. **Kawashima, K.** Damage Characteristic of Bridges Due To 2010 Chile Earthquake / K. Kawashima, S. Unjoh, J. ichi Hoshikuma, K. Kosa. — DOI <http://dx.doi.org/10.2208/jscejsee.66.386> // Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)). — 2010. — Т 66. — № 1. — С. 386–396. — URL: https://www.researchgate.net/publication/265002517_DAMAGE_CHARACTERISTIC_OF_BRIDGES_DUE_TO_2010_CHILE_EARTHQUAKE. (дата обращения: 20.04.2024).
40. **Zadeh, K.A.** An Innovative Performance-based Methodology for Evaluation of Seismic Vulnerability and Collapse of Bridges / K.A. Zadeh, C.E. Ventura, L.W. Finn // Canadian Conference — Pacific Conference on Earthquake Engineering 2023, Vancouver, British Columbia: 2023. — С. Paper ID 36 — 1. — URL: https://www.academia.edu/105726833/An_Innovative_Performance_based_Methodology_for_Evaluation_of_Seismic_Vulnerability_and_Collapse_of_Bridges. (дата обращения: 20.04.2024).
41. **Короновский, Н.В.** Непредсказуемость сильных землетрясений: новое понимание проблемы и ее решение / Н.В. Короновский, В.С. Захаров, А.А. Наймарк. — DOI <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-3-17-25> // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2021. — № 3. — С. 17–25. — URL: <https://vestnik.geol.msu.ru/jour/article/view/402>. — EDN PMRRCC. (дата обращения: 20.04.2024).
42. **Овчинников, И.Г.** Что мешает подготовке специалистов по строительству и эксплуатации автодорожных мостов в современных условиях / И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников. — DOI <https://doi.org/10.15862/03SATS123> // Транспортные сооружения. — 2023. — Т 10. — № 1. — С. 03SATS123. — URL: <https://t-s.today/03SATS123.html>. — EDN PIRYFZ. (дата обращения: 20.04.2024).

Сведения об авторах:

Нургалиева Алина Рустамовна — ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»,
Тюмень, Россия, e-mail: Nurgalievaalina140201@gmail.com

Овчинников Игорь Георгиевич — доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор базовой кафедры «АО Мостострой-11», ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия, профессор кафедры «Автомобильные дороги и мосты», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, профессор кафедры «Мосты и транспортные тоннели», ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», Екатеринбург, Россия, e-mail: bridgesar@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>
Web of Science: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

Статья получена: 10.05.2024. Принята к публикации: 03.08.2024. Опубликовано онлайн: 17.08.2024.

REFERENCES

1. Tsirel S.V., Pavlovich A.A. Interaction between seismic activity in Kuzbass and open-pit operations. *Journal of Mining Institute*. 2012;198 174–179. Available at: https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5938?setLocale=ru_RU (accessed 3rd April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
2. Ulomov V.I. [On the issue of planetary seismic activation]. *Georisk World*. 2010;(3): 4–8. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15488254> (accessed 3rd April 2024). (In Russ.).
3. Rodkin M.V., Lyubushin A.A. Can induced seismicity decrease under a long strong anthropogenic excitation? *Novel Research in Sciences*. 2023;14(3): NRS.000840. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.31031/NRS.2023.14.000840>.
4. Doocy S., Daniels A., Packer C., Dick A., Kirsch T.D. The human impact of earthquakes: a historical review of events 1980–2009 and systematic literature review. *PLoS currents*. 2013. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1371/currents.dis.67bd14fe457f1db0b5433a8ee20fb833>.
5. Petrova E. Natural hazard impacts on transport infrastructure in Russia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2020;20(7): 1969–1983. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1969-2020>.
6. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On Conceptual Provisions of Design Standards for Earthquake-Resistant Construction. *Vestnik MGSU*. 2020;15(12): 1673–1684. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.12.1673-1684>.
7. Kurbatskiy E.N., Mondrus V.L., Emelianova G.A., et al. Outdated Provisions of The Russian Federation Norms Regulating Construction in Seismic Areas. *Academia. Architecture and Construction*. 2024;(1): 159–165. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-1-159-165>.
8. Kurbatskiy E.N., Mondrus V.L., Emelianova G.A., et al. Dynamic Coefficients or Response Spectra of Structures to Earthquake? *Academia. Architecture and Construction*. 2019;(1): 107–114. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-1-107-114>.
9. Kurbatskiy E.N., Mondrus V.L., Pestriakova E.A. On The Question of The Correct Assignment of The Seismic Input Information. *Academia. Architecture and Construction*. 2021;(1): 134–143. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-1-134-143>.
10. Abovsky N.P., Sibgatulin V.G., Palagushkin V.I. et al. Some Problem Issues of Regulatory Actions and Scientific Support of Seismic Safety in The Krasnoyarsk Region. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2010;(4): 31–34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19140694> (accessed 13th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
11. Abovskiy N.P. et al. [Earthquake protection devices: current problems of earthquake safety: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2013. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006593777> (accessed 17th April 2024). (In Russ.).
12. Kawashima K., Unjoh S. The Damage of Highway Bridges in the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake and Its Impact on Japanese Seismic Design. *Journal of Earthquake Engineering*. 1997;1(3): 505–541. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/13632469708962376>.

13. Chai Y.H., Priestley M., Seible F. Seismic Retrofit of Circular Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance. *ACI Structural Journal*. 1991;88(5): 572–584. Available at: <https://trid.trb.org/view/359512> (accessed 13th April 2024). (In Eng.).
14. Malagnini L., Parsons T. Seismic Attenuation Monitoring of a Critically Stressed San Andreas Fault. *Geophysical Research Letters*. 2020;47(23): e2020GL089201. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL089201>.
15. Kartsivadze G.N. [Seismic resistance of road structures]. Moscow: Transport; 1974. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007386284> (accessed 13th April 2024). (In Russ.).
16. Kartsivadze G.N. [Damage to road structures during strong earthquakes]. Moscow: Transport; 1969. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007386283> (accessed 13th April 2024). (In Russ.).
17. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 1. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(4): 13TS417. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/13TS417>.
18. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2017;4(4): 14TS417. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/14TS417>.
19. Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 3. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018;5(1): 08SATS118. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/08SATS118>.
20. Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Ovchinnikov I.G., Uspanov A.M. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 4. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2018;5(1): 05SATS118. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/05SATS118>.
21. Karakhanyan V.B., Ovchinnikov I.I., Baev M.A., Ovchinnikov I.G. Features of the progressive destruction of bridge structures. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2020;7(2): 12SATS220. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/12SATS220>.
22. Apsemetov M.Ch., Murzakmatov D.K., Prihodko A.A., Toguztoroev A.A. Analysis Of Damage to Buildings and Bridge Constructions at Strong Earthquakes. *The Herald of KSUCTA*. 2019;(3): 479–483. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.35803/1694-5298.2019.3.479-483>.
23. Nishonov N.A., Soliyev D.I., Kuychiyev O.A. Specific Damage of Artificial Structures During Earthquakes. *Scientific Progress*. 2021;(7): 854–859. Available at: <https://cyberleninka.ru/journal/n/scientific-progress?i=1124508> (accessed 18th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
24. Baranov T.M. Bridges safety assessment at the fault creep effects. *Naukovedenie*. 2013;(1): 60TBH113. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn113.pdf> (accessed 18th April 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
25. Choudhury J.R., Hasnat A. Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. In: *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, August 21–22, 2015, Dhaka, Bangladesh*. 2015. p. 26–34. Available at: <https://www.iabse-bd.org/session/k2.pdf> (accessed 18th April 2024). (In Eng.).
26. Xia X.S., Chen X.C., Li X.Y. Analysis of Bridge Earthquake Damage and Reasonable Aseismic Systems. *Advanced Materials Research*. 2012;(433-440): 4782–4787. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.433-440.4782>.
27. Åkesson B. Understanding Bridge Collapses. London: CRC Press; 2008. Available at: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781482266108/understanding-bridge-collapses-bj%C3%B6rn-%C3%A5esson> (accessed 18th April 2024). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482266108>.
28. Hobbs Wm. H. A Study of the Damage to Bridges during Earthquakes. *The Journal of Geology*. 1908;16(7): 636–653. Available at: <https://www.jstor.org/stable/30061372> (accessed 18th April 2024). (In Eng.).
29. Kawashima K. Damage of Bridges during 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*. 2011;12(4): 319–338. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.5610/jaee.12.4_319.
30. Mackie K.R., Stojadinović B. Post-earthquake functionality of highway overpass bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2006;35(1): 77–93. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.534>.

31. Huang Y., Yin M.C., He J., Cai L.W. Analysis of Damage Mechanism of Heihe Bridge during the Maduo Earthquake. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023;2476 12034. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2476/1/012034>.
32. Kawashima K., Takahashi Y., Ge H., Wu Z., Zhang J. Damage of Bridges In 2008 Wenchuan, China Earthquake. *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*. 2009;65(3): 825–843. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2208/jsceja.65.825>.
33. Tong L., Wang R., Wang D. Seismic cracking mechanism and control for pre-stressed concrete box girders of continuous rigid-frame bridges: Miaoziping bridge in Wenchuan earthquake as an example. *Advances in Bridge Engineering*. 2021;2(1): 17. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1186/s43251-021-00040-z>.
34. Palermo A., Liu R., Rais A., McHaffie B. et al. Performance of road bridges during the 14 November 2016 Kaikōura Earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*. 2017;50(2): 253–270. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5459/bnzsee.50.2.253-270>.
35. Wotherspoon L., Bradshaw A., Green R., Wood C. et al. Performance of Bridges during the 2010 Darfield and 2011 Christchurch Earthquakes. *Seismological Research Letters*. 2011;82(6): 950–964. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.6.950>.
36. Esper P., Tachibana E. Lessons from the Kobe earthquake. *Engineering Geology Special Publications*. 1998;15: 105–116. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.ENG.1998.015.01.11>.
37. Gazetas G., Anastasopoulos I., Gerolymos N. et al. The Collapse of the Hanshin Expressway (Fukae) Bridge, Kobe 1995: Soil-Foundation-Structure Interaction, Reconstruction, Seismic Isolation. In: Rackwitz, F. (eds). *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik*. Berlin: Springer; 2006. p. 93–120. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-27438-3_7 (accessed 20th April 2024). (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-27438-3_7.
38. Cooper J.D., Buckle I. Lessons from the Kobe Quake. *Public Roads*. 1995;59(2). Available at: <https://highways.dot.gov/public-roads/autumn-1995/lessons-kobe-quake> (accessed 20th April 2024). (In Eng.).
39. Kawashima K., Unjoh S., Hoshikuma J. ichi, Kosa K. Damage Characteristic of Bridges Due To 2010 Chile Earthquake. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*. 2010;66(1): 386–396. (In Eng.) DOI: <http://dx.doi.org/10.2208/jscejseee.66.386>.
40. Zadeh K.A., Ventura C.E., Finn L.W. An Innovative Performance-based Methodology for Evaluation of Seismic Vulnerability and Collapse of Bridges. In: *Canadian Conference — Pacific Conference on Earthquake Engineering 2023, Vancouver, British Columbia*. 2023. p. Paper ID 36 — 1. Available at: https://www.academia.edu/105726833/An_Innovative_Performance_based_Methodology_for_Evaluation_of_Seismic_Vulnerability_and_Collapse_of_Bridges (accessed 20th April 2024). (In Eng.).
41. Koronovsky N.V., Zakharov V.S., Naimark A.A. Unpredictability of strong earthquakes: new understanding of the problem and its solution. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2021;(3): 17–25. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2021-3-17-25>.
42. Ovchinnikov I.G., Valiev Sh.N., Ovchinnikov I.I. What hinders the training of specialists in the construction and operation of road bridges in modern conditions. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2023;10(1): 03SATS123. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15862/03SATS123>.

Information about the authors:

Alina R. Nurgalieva — Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, e-mail: Nurgalievaalina140201@gmail.com

Igor G. Ovchinnikov — Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia, e-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=7102605749>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57191523105>

Web of Science: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/J-5539-2013>

Submitted: 10th May 2024. Revised: 3rd August 2024. Published online: 17th August 2024.