



СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ

ISSN 2618-9283

DOI 10.37153/2618-9283

EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY

03 2023

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
www.seismoconstruction.ru



Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений

Научно-технический журнал

«Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений» – сетевое научно-техническое рецензируемое издание, охватывающее весь спектр вопросов в области проектирования, строительства, эксплуатации объектов в сейсмически опасных районах России и стран СНГ.

Миссия журнала – развитие строительной науки в области сейсмостойкого строительства; публикация материалов и результатов фундаментальных исследований и достижений ученых, специалистов в области надежности и безопасности зданий и сооружений.

В журнале публикуются статьи по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки);

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки) (с 15 февраля 2023);

1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки) (с 15 февраля 2023).

1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки).

Включен в утвержденный ВАК Минобрнауки России Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. В действующем Перечне от 31.05.2023 г. под номером 2314.

С 24 мая 2021 года журнал входит в Russian Science Citation Index (RSCI). Журнал принимает к публикации: оригинальные статьи, обзоры, дискуссионные материалы, комментарии, рецензии, информационные материалы.

ISSN: 2618-9283 (online) DOI: 10.37153/2618-9283

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-72754 от 17.05.2018 года. Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издатель – Российская Ассоциация по сейсмостойкому строительству и защите от природных и техногенных воздействий (РАСС) (<http://raee.su>).

Учредитель – А.А. Бубис.

Сайт сетевого издания: <http://seismoconstruction.ru>

Адрес Издателя и редакции: 109428, город Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, строение 37.

Телефон: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65. E-mail: info@raee.su

Периодичность: 6 раз в год

Даты выхода в свет: февраль, апрель, июнь, август, октябрь, декабрь.

Earthquake Engineering. Constructions Safety **Scientific and technical journal**

«Earthquake engineering. Constructions Safety» is a network scientific and technical peer-reviewed publication covering the entire range of issues in the field of design, construction, and operation of facilities in seismically dangerous areas of Russia and the CIS countries.

The mission of the journal is to develop the science of earthquake-resistant construction; to publish materials and results of fundamental research and achievements of scientists in the field of reliability and safety of buildings and structures.

The journal publishes articles on the following scientific specialties and related branches of science:

2.1.1 – Building structures, buildings and structures (technical sciences);

2.1.2 – Foundations, underground structures (technical sciences);

2.4.9 – Nuclear power plants, fuel cycle, radiation safety (technical sciences) the (from February, 15, 2023);

1.6.1 – General and regional geology. Geotectonics and geodynamics science (geological and mineralogical sciences) (from February, 15, 2023);

1.6.7 – Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences).

Included in the List of peer-reviewed scientific publications, where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of candidate of Sciences, on competition of a scientific degree of the doctor of Sciences, approved by Supreme Attestation Commission (VAK) of the Ministry of education and science.

In the current List of 31.05.2023 listed under the 2314 position.

Since May 24, 2021 included in the Russian Science Citation Index (RSCI).

The journal accepts for publication: original articles, reviews, discussion materials, comments, reviews, informational materials.

ISSN: 2618-9283 (online) **DOI:** 10.37153/2618-9283

Certificate of registration EL № FS 77-72754 dated 17.05.2018. Registered by the Federal service for supervision of communications, information technologies and mass communications (Roskomnadzor).

Publisher: Russian Association for earthquake-resistant construction and protection from natural and manmade hazards (RAEE) (<http://raee.su>).

The Founder: A.A. Bubis.

Website of the online publication: <http://seismoconstruction.ru>

Address of the **Publisher** and **editorial office:** 109428, Moscow, ul. 2-ya Institutskaya, house 6, building 37. Phone: 8-499-174-75-82; 8-499-174-70-65.

E-mail: info@raee.su

Frequency: 6 times a year.

Release dates: February, April, June, August, October, December.

Главный редактор

Ведяков И.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Бубис А.А., PhD, кандидат технических наук АО «НИЦ «Строительство»
(Москва, Российская Федерация)

Ответственный секретарь редколлегии

Смирнова Л.Н., кандидат технических наук
(Москва, Российская Федерация)

Редакционная коллегия

Акулов Н.И., доктор геолого-минералогических наук
(Иркутск, Российская Федерация)

Алешин А.С., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Белаш Т.А., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Вада Акира, доктор, профессор
(Токио, Япония)

Вознесенский Е.А., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Гусев Б.В., доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН
(Москва, Российская Федерация)

Захаров В.С., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Ильичев В.А., доктор технических наук, профессор, Академик РААСН
(Москва, Российская Федерация)

Клементе Паоло, доктор, профессор
(Рим, Италия)

Кривцов Ю.В., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Лапин В.А., кандидат технических наук, профессор
(Алматы, Республика Казахстан)

Немчинов Ю.И., доктор технических наук, профессор
(Киев, Республика Украина)

Норузинежад Фарсанги Исан, доктор, профессор
(Керман, Иран)

Павленко О.В., доктор физико-математических наук
(Москва, Российская Федерация)

Римшин В.И., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Семенов В.А., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Тонких Г.П., доктор технических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Уздин А.М., доктор технических наук, профессор
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Хакимов Ш.А., кандидат технических наук, профессор
(Ташкент, Республика Узбекистан)

Хачиян Э.Е., доктор технических наук, профессор
(Ереван, Республика Армения)

Чеверев В.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор
(Москва, Российская Федерация)

Чимелларо Джан Паоло, адъюнкт-профессор
(Турин, Италия)

Эмри И., доктор, профессор
(Любляна, Республика Словения)

«*EARTHQUAKE ENGINEERING. CONSTRUCTIONS SAFETY*»

Editor-in-Chief

Vedyakov I.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor
(Moscow, Russian Federation)

Deputy editor-in-Chief

Bubis A.A., PhD (Engineering) JSC Research Center of Construction
(Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary

Smirnova L.N., PhD (Engineering)
(Moscow, Russian Federation)

Editorial board

Akulov N.I., Dr. Sci. (Geology), Professor (Irkutsk, Russian Federation)

Aleshin A.S., Dr. Sci. (Mathematics and Physics), Professor (Moscow, Russian Federation)

Belash T.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Wada Akira, PhD, Professor Emeritus (Tokyo, Japan)

Voznesenskii E.A., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Gusev B.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Zakharov V.S., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Il'ichev V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russian Federation)

Clemente Paolo, PhD, Professor (Rome, Italy)

Krivtsov Yu.V., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Lapin V.A., PhD, Professor (Almaty, Republic of Kazakhstan)

Nemchinov Yu.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Kiev, Ukraine)

Noroozinejad Farsangi Ehsan, PhD of Civil Engineering, Professor (Kerman, Iran)

Pavlenko O.V., Dr. Sci. (Mathematics and Physics) (Moscow, Russian Federation)

Rimshin V.I., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Semenov V.A., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Tonkikh G.P., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Moscow, Russian Federation)

Uzdin A.M., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Saint-Petersburg, Russian Federation)

Khakimov Sh., PhD (Engineering), Professor (Tashkent, Republic of Uzbekistan)

Khachiyan E.E., Dr. Sci. (Engineering), Professor (Yerevan, Republic of Armenia)

Cheverev V.G., Dr. Sci. (Geology), Professor (Moscow, Russian Federation)

Cimellaro Gian Paolo, Associate Professor (Turin, Italy)

Emri Igor, PhD, Professor (Ljubljana, Republic of Slovenia)

СОДЕРЖАНИЕ

№ 3 – 2023

Мониторинг и паспортизация зданий и сооружений**Альдребби З.А.**

Подготовка к восстановлению строительных конструкций памятников архитектуры Пальмиры в Сирии, пострадавших в результате войны 8

Теоретические и экспериментальные исследования

Чуркин А.А., Смирнов И.Д. Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция–грунт» 32

Абаев З.К., Валиев А.Дж., Кодзаев М.Ю.

Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта 48

Харланова С.В., Харланов В.Л.

Моделирование акселерограмм высокой интенсивности на основе вейвлет–преобразования 73

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений**Калиберда И.В., Пименов В.И.**

Обеспечение сейсмостойкости гидротехнических сооружений при землетрясениях 81

Фото на обложке номера из открытых источников.

12+

ISSN 2618-9283(с) РАСС, 2023

CONTENTS

№ 3 – 2023

Monitoring and certification of seismic construction

Aldrebi Z.A.

Preparation for the restoration of building structures of Palmyra's architectural monuments in Syria affected by the war 8

Theoretical and experimental studies

Churkin A.A., Smirnov I.D.

Development of normalized acoustic response analysis for soil-structure contact state evaluation 32

Abaev Z.K., Valiev A.D., Kodzaev M.Yu.

Development of recommendations for the implementation of seismic risk mitigation policy in the Russian Federation based on world experience 48

Kharlanova S.V., Kharlanov V.L.

Modeling of high-intensity accelerograms based on the wavelet transform 73

Design, building and reconstruction of a seismic constructions

Kaliberda I.V., Pimenov V.I.

Ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in case of earthquakes 81

Photo on the cover of the issue – from the open sources.

УДК 69.059; 69.059.3; 69.059.35; 72.025.4; 72.026

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-8-31](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-8-31)

Monitoring and certification of buildings and structures

Preparation for the restoration of building structures of Palmyra's architectural monuments in Syria affected by the war

Ziad A. Aldrebi¹

¹“Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University”.
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: *Introduction.* The historical architectural monuments of world significance of the city of Palmyra in Syria, which are included in the UNESCO World Heritage List, such as the Monumental (Triumphal) Arch, the Temple of Bel, and the Temple of Baalshamin are described. The history of their creation in the city of Palmyra, their significance for the inhabitants of Palmyra of that period and destruction from past earthquakes and during hostilities since 2015 are given. The importance of these monuments for the country and the world community is indicated, which was the reason for their choice as objects for research.

Aim. The research is intended to contribute to the restoration of these masterpieces of world architecture, which have existed for a little less than two millennia.

Materials and methods. A kind of certification of architectural monuments on the territory of Palmyra was carried out using the visual method of studying the state of objects. A detailed description and characteristics of the above-mentioned objects built as a synthesis of Greco-Roman and ancient Near Eastern architecture are given. The distinctive features and dimensions of building structures are described, plans, sections and photographs of objects before and after destruction are given for their subsequent reconstruction virtually in 3D. To improve the accuracy of three-dimensional models, various projects of 3D models of Palmyra's architectural monuments, created by various scientists and organizations, were collected.

Results. The states of the architectural monuments of Palmyra before and after the destruction were recorded, followed by their reconstruction in 3D for future restoration.

Conclusions. Conclusions are drawn about the expediency of restoring the architectural monuments of Palmyra, since they are of great importance for the entire world community, and many of them are included in the UNESCO World Heritage List.

Keywords: architectural monuments, Palmyra, temple of Baalshamin, temple of Bel, Monumental (Triumphal) arch, Great colonnade street, theater, tetrapylon, 3D reconstruction

For citation: Aldrebi Z.A. Preparation for the restoration of building structures of Palmyra's architectural monuments in Syria affected by the war. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp.8–31. DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-8-31](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-8-31)

Author contribution statement: The author takes responsibility of all the aspects of the article preparation.

@ Z.A. Aldrebi, 2023

Funding: No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

Мониторинг и паспортизация зданий и сооружений

Подготовка к восстановлению строительных конструкций памятников архитектуры Пальмиры в Сирии, пострадавших в результате войны

Аldreби Зиад Ахмад¹

¹ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: *Введение.* Описываются исторические памятники архитектуры мирового значения в Пальмире в Сирии, которые входят в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, такие как Монументальная (Триумфальная) арка, храм Баала (Бела), храм Баальшамина. Приводится история их создания в городе Пальмира, их значение для жителей Пальмиры того периода и разрушения от прошлых землетрясений и во время боевых действий, начиная с 2015 года. Указывается важное значение этих памятников для страны и мирового сообщества, что явилось причиной их выбора в качестве объектов исследования.

Цель. Исследование предназначено для того, чтобы внести вклад в восстановление этих шедевров мировой архитектуры, которые существовали на протяжении почти двух тысячелетий.

Материалы и методы. Выполнена своего рода паспортизация памятников архитектуры на территории Пальмиры с использованием визуального метода исследования состояния объектов. Даны характеристики и подробное описание вышеназванных объектов, построенных как синтез греко-римской и древней ближневосточной архитектуры. Описаны отличительные черты и размеры строительных конструкций, приведены планы, разрезы и фотографии объектов до и после разрушений для последующей их реконструкции виртуально в 3D. Для повышения точности трехмерных моделей были собраны различные проекты 3D-моделей архитектурных памятников Пальмиры, созданные различными учеными и организациями.

Результаты. Зафиксировано состояние памятников архитектуры Пальмиры до и после разрушений с последующей их реконструкцией в 3D для будущего восстановления.

Выводы. Сделаны выводы о целесообразности восстановления памятников архитектуры Пальмиры, так как они имеют огромное значение для всего мирового сообщества, к тому же многие из них входят в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.

Ключевые слова: памятники архитектуры, Пальмира, храм Баальшамина, храм Баала (Бела), Монументальная (Триумфальная) арка, улица Большая колоннада, театр, тетрапилон, 3D-реконструкция

Для цитирования: Aldrebi Z.A. Подготовка к восстановлению строительных конструкций памятников архитектуры Пальмиры в Сирии, пострадавших в результате войны // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С.8-31
DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-8-31](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-8-31)

Вклад автора: Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование: Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Introduction

Palmyra is an ancient city originally founded in 1500 BC, and located in the Syrian Desert on the territory of the modern province of Homs in Syria, 240 km northeast of the capital Damascus. Palmyra originated as a transit or staging post for caravans that crossed the Syrian Desert, a kind of oasis in this desert, as it was known for its fertile soil and water wells. Palmyra was known as the bride of the desert and the Venice of the sands.

The city gained fame a little over 1700 years ago during the reign of Queen (Fig. 1) Zenobia (240–275), who was called the queen of warriors and in many ways resembled the Egyptian Cleopatra. She ruled like Cleopatra and was defeated by the Romans around 273–274. Her reign coincided with an era when the Romans began to take an interest in Palmyra, first for economic and later for political reasons. The sharp increase in the interest of the Romans in oriental goods led to a sudden increase in the importance of Palmyra to the size of one of the largest cities in the East [18–20]. The city connected the Roman world with Mesopotamia, caravans transited through Palmyra, crossing the Syrian Desert, and their transit brought wealth to the city [3]. Its sudden and enormous prosperity was brought to an end by the Romans. From the day when the Roman emperor Aurelian (Fig. 2) ended Zenobia's rule over the desert, trade routes parted, and the importance of Palmyra began to decline [1, 4, 5, 8, 21].

The rich cultural heritage, which constitutes a significant part of the intellectual wealth of society, is constantly under the threat of destruction. Threats of destruction come primarily from disagreements and conflicts and from natural disasters such as earthquakes. Wars have always harmed cultural heritage as well as human life. For example, the damage to the UNESCO World Heritage Sites of the Bamiyan Buddha Statues in Afghanistan in 2001, which are more than 1,700 years old, was followed by serious damage to the ancient city of Palmyra in Syria in 2015, which is also a UNESCO World Heritage Site [6, 9].

In Palmyra, before the destruction in 2015 during the hostilities, there were well-preserved temples dedicated to the ancient Mesopotamian gods, the Great Colonnade Street with Corinthian columns, the Monumental (Triumphal) Arch, the theater [7], the castle and the valley of tombs (Fig. 3–5). The city was considered one of the most majestic cities of the ancient world partially destroyed by time and cataclysms [17]. As one of the outstanding cultural centers of the world, it has been included in the UNESCO World Heritage List.

To restore the architectural monuments of Palmyra in Syria, the first step is to create their 3D models. The generally accepted algorithm for creating 3D models [11, 12, 13, 16] is as follows: Measurements of historical objects should mainly be carried out using laser-scanning technology for their subsequent 3D modeling. It is worth noting that merging scans into a single cloud of laser scanning points is a laborious process, and building an accurate dimensional 3D model of objects takes a lot of time, since software for designing buildings and structures gives few opportunities for accurate modeling non-ideal or imperfect walls of old buildings and structures.

Labor and financial costs for the production of measurement works and the construction of 3D models of buildings and structures can differ significantly depending on the required final detail and accuracy of the final model and on the complexity of the object itself. The duration and complexity of the shooting process depends on the distance to nearby buildings and the height of the building being shot, as well as on the possibility of shooting from the roofs of neighboring buildings.



Figure 1 – Zenobia in chains of the Roman emperor Aurelian
(Sculpture by Harriet Hosmer, 1859)

Figure 1 – Зенобия в цепях римского императора Аврелиана
(Скульптура Хэрриет Хосмер, 1859)



Figure 2 – The image of the Roman emperor Aurelian on a gold coin

Figure 2 – Изображение римского императора Аврелиана на золотой монете

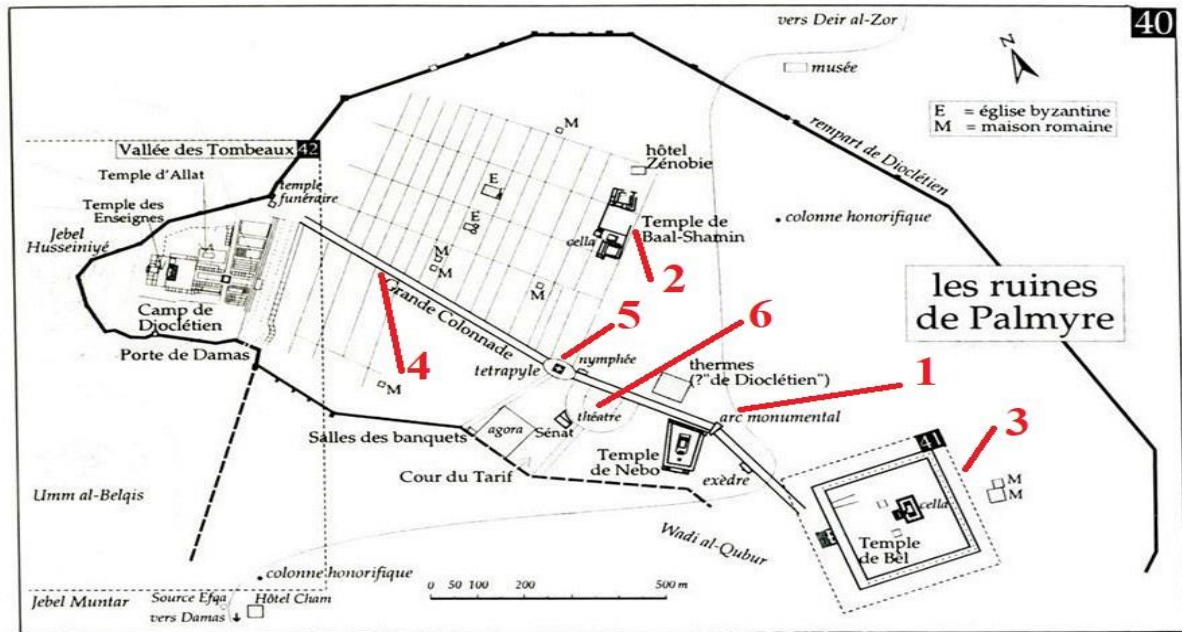


Figure 3 – Map of Palmyra, Syria:
1– Monumental Arch; 2–Temple of Baalshamin; 3– Temple of Bel; 4– Great Colonnade street; 5–Tetrapylon; 6–Theatre

Figure 3 – Карта г. Пальмиры, Сирия:
1– монументальная арка; 2–храм Баальшамина; 3– храм Баала (Бела); 4– улица Большая колоннада; 5–тетрапилон; 6–театр



Figure 4 – Palmyra before destruction (top view)

Рисунок 4 – Пальмира до разрушений (вид сверху)



Figure 5 – Great Colonnade Street (top view)

Рисунок 5 – Улица Большая колоннада (вид сверху)

Ancient water supply system

A system of pipelines (Fig. 6,a) and aqueducts to supply Palmyra with water from wells (Fig. 6,b) and grottoes existed before and during the reign of Queen Zenobia. They supplied the city and the caravans passing through it with precious water in the desert conditions.

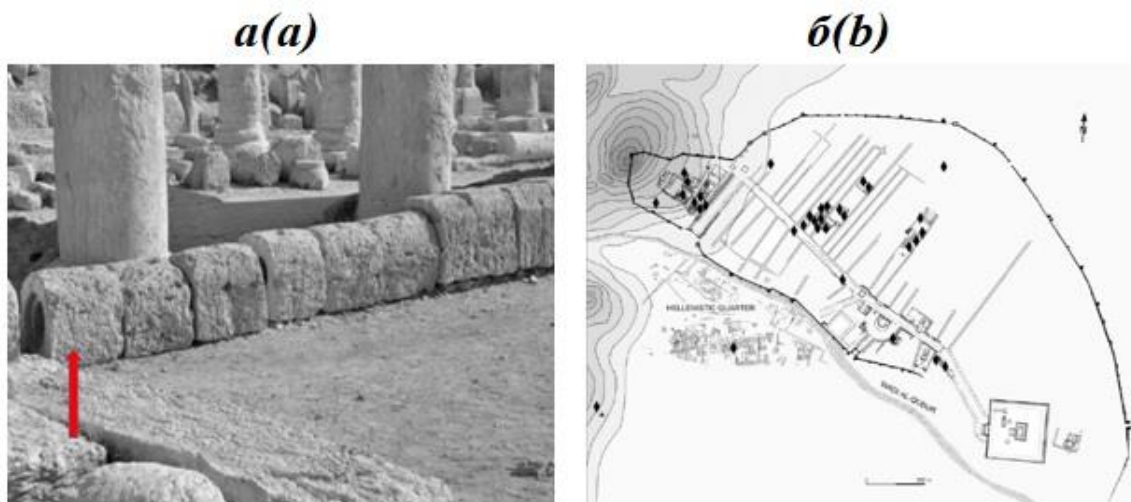


Figure 6 – The ancient water supply system of Palmyra:
a – Stone pipeline near the amphitheater (shown by arrow); *b* – Ancient wells on the territory of Palmyra (indicated by black diamonds)

Рисунок 6 – Древняя система водоснабжения Пальмиры:
a – каменный трубопровод недалеко от амфитеатра (показан стрелкой); *b* – древние колодцы на территории Пальмиры (обозначены черными ромбами)

Palmyra in the conditions of hostilities in Syria after 2011

Radical militants in a barbaric way, which is undoubtedly an act of vandalism, were destroyed in the following chronology, the Temple of Baalshamin was destroyed on August 24, 2015, then the Temple of Baal (Bel) was destroyed on August 31, 2015, then on October 4, 2015, the Monumental (Triumphal) Arch, and the main street of Palmyra, the so-called Great Colonnade Street, was partially destroyed. These architectural monuments were unique and combined mixed architectural styles, in which Greco-Roman architecture and ancient Near Eastern architecture were present. Currently, many masterpieces of world architecture in Palmyra are on the verge of extinction or have almost disappeared. This is an irreparable loss of UNESCO World Heritage Sites for us and for posterity.

The task of scientists and researchers is to reconstruct virtually with the help of modern science the above monuments of architecture so that they are preserved at least in such a virtual form for future generations and, of course, for their possible restoration. Three-dimensional computer graphics or 3D modeling allow you to virtually reconstruct, fix, preserve their previous state before destruction, and restore their authenticity and original appearance for the subsequent possible restoration of these beautiful architectural monuments, the building structures of which are an example of the high skill of ancient builders and a standard for their modern colleagues.

Since 2015, several steps have been taken around the world to preserve and revive the memory of the lost splendor of Palmyra, reconstructing the city's objects in 3D, thereby striving to resurrect them virtually in order to further restore the lost masterpieces of world architecture in Palmyra.

For example, a project called "Virtual Palmyra" was launched by a Turkish researcher, PhD Denker Ahmet with his students from Istanbul Bilgi University, or in the Russian Federation, by the Center for Rescue Archeology of the Institute of the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences, together with the Russian Geographical Society and Syrian specialists, was created a 3D model project Monumental (Triumphal) arch of Palmyra for its further restoration. Founded in France in 2013, Iconem is an innovative start-up that specializes in digitizing endangered cultural heritage objects, in 3D, together with the General Directorate of Antiquities and Museums of Syria (DGAM), 3D models of many of Palmyra's historical sites have been created. The California-based Arc/k project, created by an organization founded in 2014 in Los Angeles, has been working to create an online database of endangered historic sites. In particular, 3D models of the Monumental (Triumphal) Arch, the Temple of Bel, the Amphitheater and the Castle, which are located in Palmyra, were created.

The 3D models of the Temple of Bel and the Palmyra Triumphal Arch were created by Wissam Wahbeh, who is a PhD in architecture, lecturer in information modeling of buildings and structures, computational design, reconstruction of cultural heritage at the University of Applied Sciences and Arts of Northwestern Switzerland. The results of some of the above-mentioned 3D models have been presented in several figures in this article.

It is worth noting that the creation of 3D models of the same architectural objects by various specialists and organizations increases the accuracy and truthfulness of such models and brings them as close as possible to the original.

Temple of Baal (Bel)

In Palmyra, the main sanctuary is the Temple [10] of Baal (Bel) (Fig. 7). It was located on a stepped base in the middle of an almost square open courtyard measuring 175 x 180 m. The main building of the temple at the level of the stylobate rises above a rectangular

area measuring 29.52 m x 54.6 m. The building was surrounded by a portico about 30 m deep, therefore, the external dimensions of the temenos (the sacred area of the temple) were increased to 205 x 210 m, its central room was rectangular in shape and was surrounded on four sides by columns, and on the ends of the building there were in two rows. The Great Colonnade Street leads to its entrance. The central entrance to the temple was located on the longitudinal side, and not on the front side, as in other ancient temples. The entrance was distinguished by powerful pylons with stone reliefs. The inner space of the temple of Baal was a large hall not separated by either colonnades or walls. The temple was a magnificent synthesis of Greco-Roman and ancient Middle Eastern architecture.

The ancient builders erected the Temple of Baal in honor of the local supreme Mesopotamian god Baal (Bel), who was revered in the city and considered the main god of Palmyra and was equal to the Roman god Jupiter and the Greek god Zeus. The building structures of the temple before the destruction was in good condition.

Corinthian columns existed on the outer wall. The porticos of the temple had double rows of Corinthian columns. The exception was the western side, where only one row of columns existed. The ends of the Temple stood in a north-south direction. The main axis of the Temple was deviated by 5 degrees from the north-south axis and divided its open courtyard into two asymmetrical parts, namely in a ratio of 3:2. The western part had a depth of about 105 m, and the eastern part had a depth of 70 m. The inner part or main building, the so-called Cella, was a rectangular building measuring 15.8 x 39 m. (Fig. 8). This building was surrounded by one row of Corinthian columns, 8 columns from the north side and from the south side, 12 columns each on the west side and 13 columns each on the east side. The height of these columns was about 15.81 m, and their base diameter was about 1.33 m, the height of the building was 33.14 m (Fig. 9).

Until its destruction on August 31, 2015 (Fig. 10), this temple impressed visitors and tourists as it was one of the most impressive and famous structures in the Syrian Palmyra. This ancient city was associated with this magnificent temple.

Figures 11–14 show 3D models of the Temple of Baal (Bel) made by different organizations and scientists.



Figure 7 – Temple of Bel in Palmyra, Syria

Рисунок 7 – Храм Баала (Бела) в Пальмире, Сирия

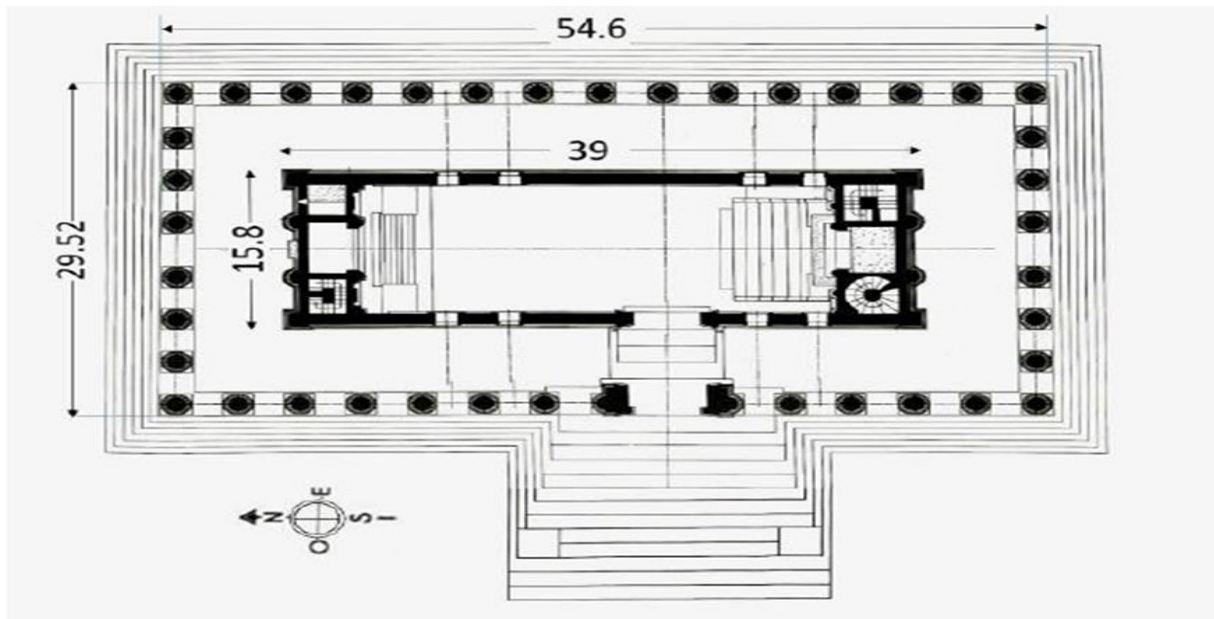


Figure 8– Plan of the Temple of Bel, (dimensions in m)

Рисунок 8 – План храма Баала (Бела), (размеры в м)

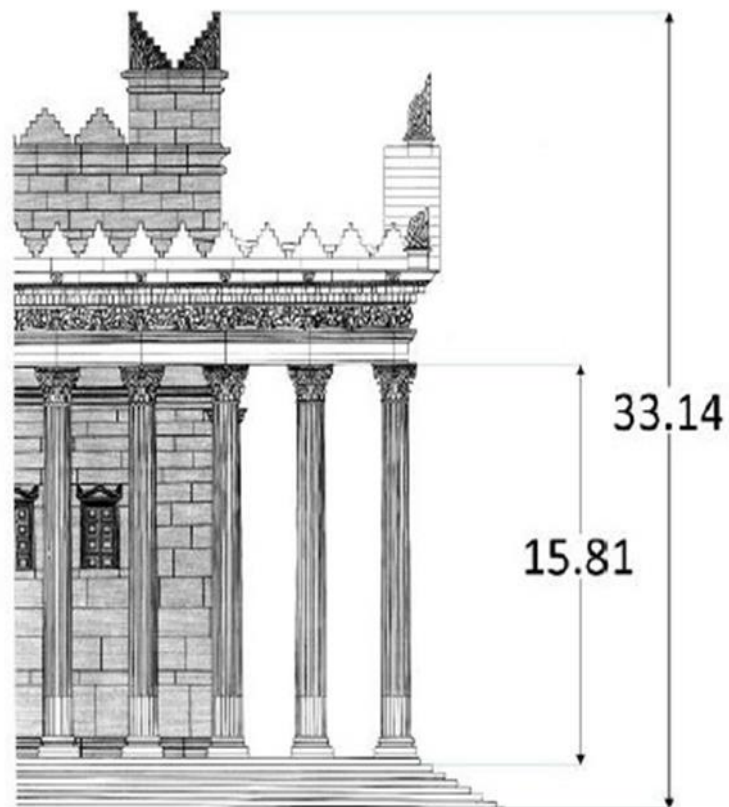


Figure 9 – Side view of the main building of the Temple of Bel, (dimensions in m)

Рисунок 9 – Вид сбоку главного здания храма Баала (Бела), (размеры в м)



Figure 10 – The ruined Temple of Bel

Рисунок 10 – Разрушенный храм Баала (Бела)



Figure 11 – 3D of the destroyed Temple of Bel in Palmyra (Source: Iconem and DGAM)

Рисунок 11 – 3D разрушенного храма Баала (Бела) в Пальмире
(Источник: Iconem and DGAM)



Figure 12 – 3D reconstruction of the Temple of Bel and its temenos in Palmyra (state before destruction) (Source: Arc/k project)

Рисунок 12 – 3D-реконструкция храма Баала (Бела) и его теменоса в Пальмире (состояние до разрушения) (Источник: Arc/k project)

A notable aspect of the architecture of the Temple of Bel is the asymmetry of the columns on the sides. This was due to the fact that access to the cella was not through the front door. The door was placed asymmetrically on the side wall, requiring the visitor to turn 90° to view the cult site (Fig. 13).

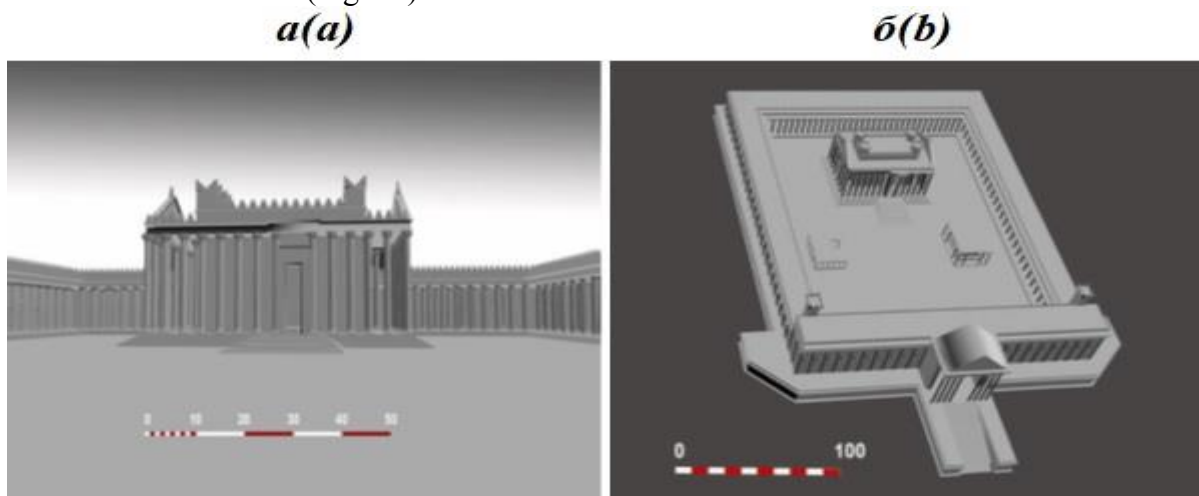


Figure 13 – 3D reconstruction of the Temple of Bel:
a – Full 3D reconstruction of the western side of the Temple of Bel in accordance with historical records, (scale in m); *b* – Full 3D Reconstruction of the Temple of Bel and its temenos in Palmyra in accordance with historical records. Bird's-eye view (scale in m) (Source: Denker Ahmet)

Рисунок 13 – 3D-реконструкция храма Баала (Бела):
a – Полная 3D-реконструкция западной стороны храма Баала (Бела) в соответствии с историческими записями, (шкала в м); *б* – Полная 3D-реконструкция храма Баала (Бела) и его теменоса в Пальмире в соответствии с историческими записями. Вид с высоты птичьего полета (шкала в м) (Источник: Denker Ahmet)

The temple of Bel in its appearance was built according to the canons of Hellenistic architecture (Fig. 13). The entrance to the courtyard was carried out from the western side through the monumental propylaea (that is, the front passage formed by porticos and columns) 35 m wide. This entrance occupied almost one sixth of the front wall. Visitors were led to the gate by a majestic staircase. The facade was decorated with a projecting portico with 8 columns (Fig. 14).



Figure 14 – Complete 3D reconstruction of the monumental propylaea of the Temple of Baal (Bel) in accordance with historical records (Source: Denker Ahmet)

Рисунок 14 – Полная 3D-реконструкция монументальных пропилеев храма Баала (Бела) в соответствии с историческими записями (Источник: Denker Ahmet)

Temple of Baalshamin

The Temple of Baalshamin (Fig. 15) was located 200 m north of the Great Colonnade Street. It was facing east. The main temple building was located in a semi-rectangular temenos with a maximum length of 163 m and a maximum width of 58 m (Fig. 16).



Figure 15 – The Temple of Baalshamin in Palmyra, Syria, before the destruction

Рисунок 15 – Храм Баальшамина в Пальмире, Сирия, до разрушения

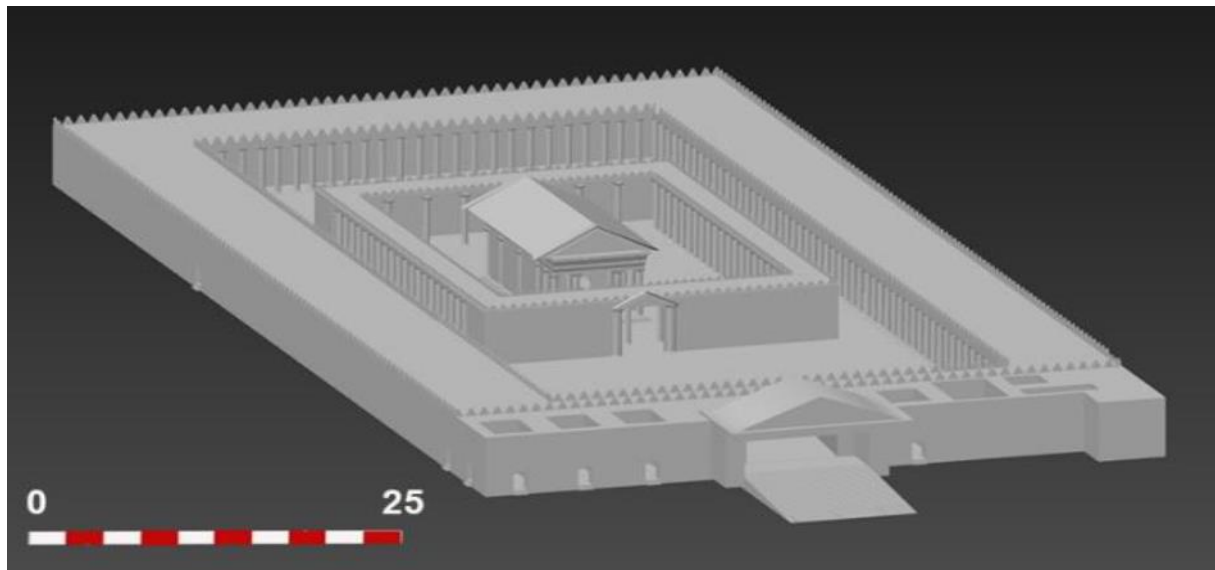


Figure 16 – Full 3D reconstruction of the Temple of Baalshamin and its temenos in Palmyra in accordance with historical records. Bird's-eye view (scale in m) (Source: Denker Ahmet)

Рисунок 16 – Полная 3D-реконструкция храма Баальшамина и его теменоса в Пальмире в соответствии с историческими записями. Вид с высоты птичьего полета (шкала в м) (Источник: Denker Ahmet)

As in the case of the Temple of Bel, the Temple of Baalshamin [15] also demonstrated hybridity in design. Greco-Roman features were demonstrated by its colonnade, prostyle, facade and tetrastyle structure i.e. with four columns in front.

The main building of the temple stood on a stylobate measuring 10.6 x 16.9 m (Fig. 17). The four free-standing columns of the portico are made in the Corinthian order. They were 7.8 m high and stood on Attic bases; the total height of the building was 12.9 m (Fig. 18). The walls of the cella were decorated with flat plaster in the Corinthian style.

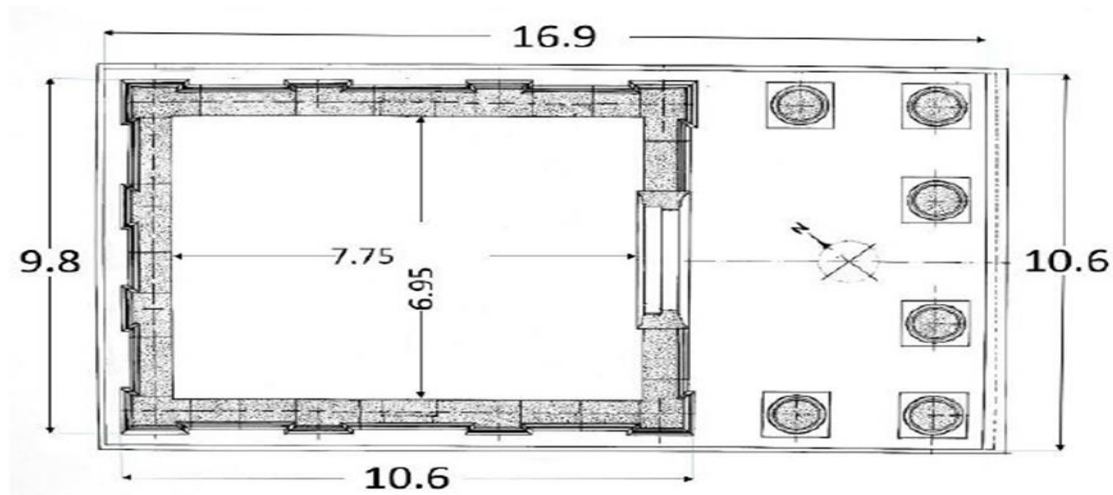


Figure 17 – Plan of the main building of the Temple of Baalshamin (dimensions in m)

Рисунок 17 – План главного здания храма Баальшамина (размеры в м)

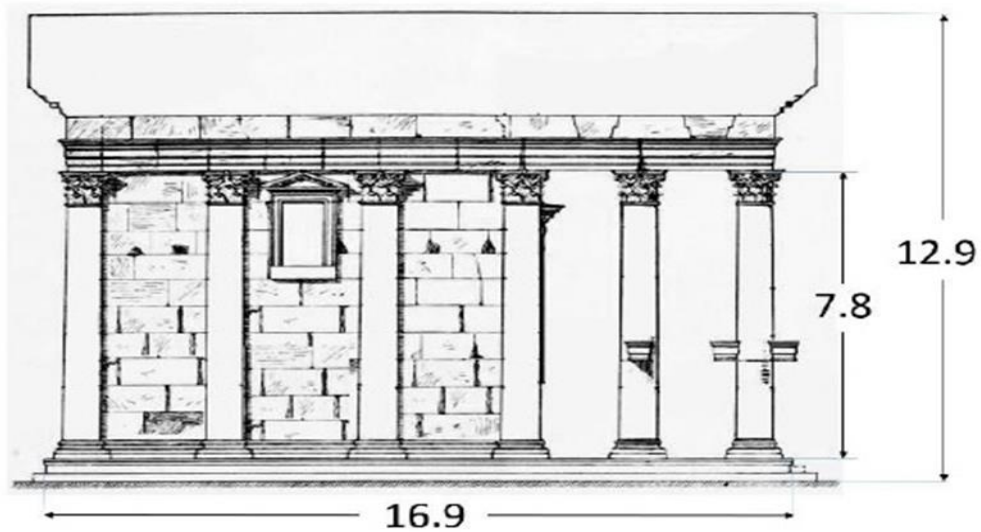


Figure 18 – Side view of the Temple of Baalshamin (dimensions in m)

Рисунок 18 – Вид сбоку храма Баальшамина (размеры в м)

The Association for the Protection of Syrian Archaeology reported that the temple of Baalshamin was destroyed by radical militants in August 2015 (Fig.19).



Figure 19 – The ruined Temple of Baalshamin

Рисунок 19 – Разрушенный храм Баальшамина

Along with the general classical Greco-Roman appearance, it also reflects pronounced Near Eastern motives. The most notable of these were the cella windows. A three-

dimensional reconstruction [14] of the Temple of Baalshamin and its environs is shown in Figures 20–22.

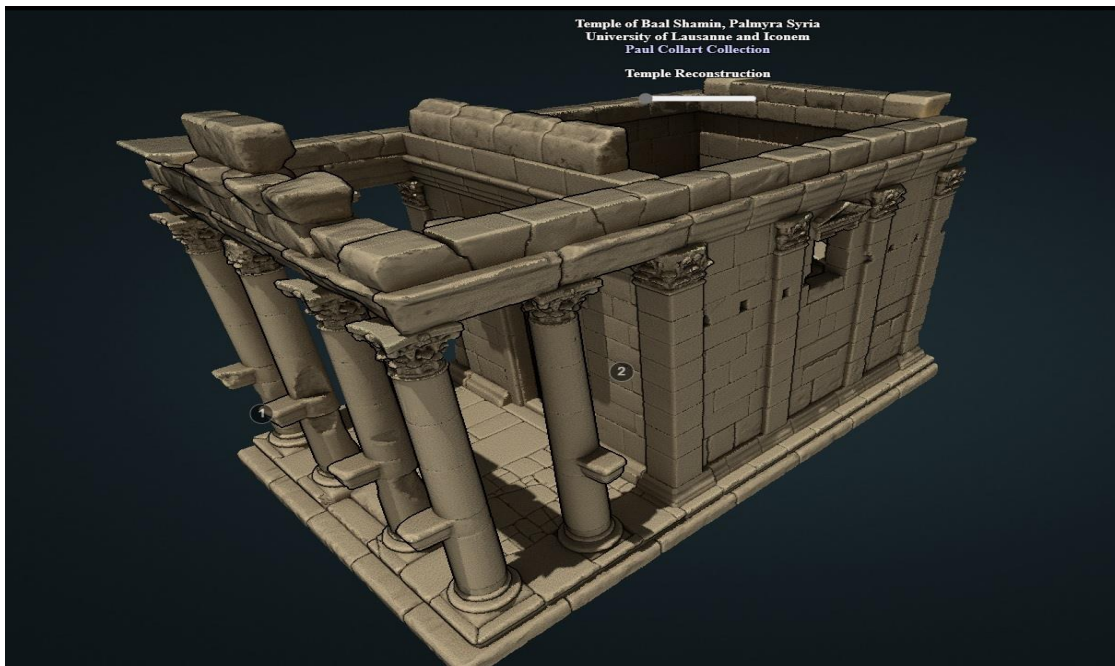


Figure 20 – 3D reconstruction of the Temple of Baalshamin in Palmyra corresponding to the state before the destruction (Source: archeologie.culture.gouv.fr and Iconem)

Рисунок 20 – 3D-реконструкция храма Баальшамина в Пальмире, соответствующая состоянию до разрушения (Источник: archeologie.culture.gouv.fr and Iconem)

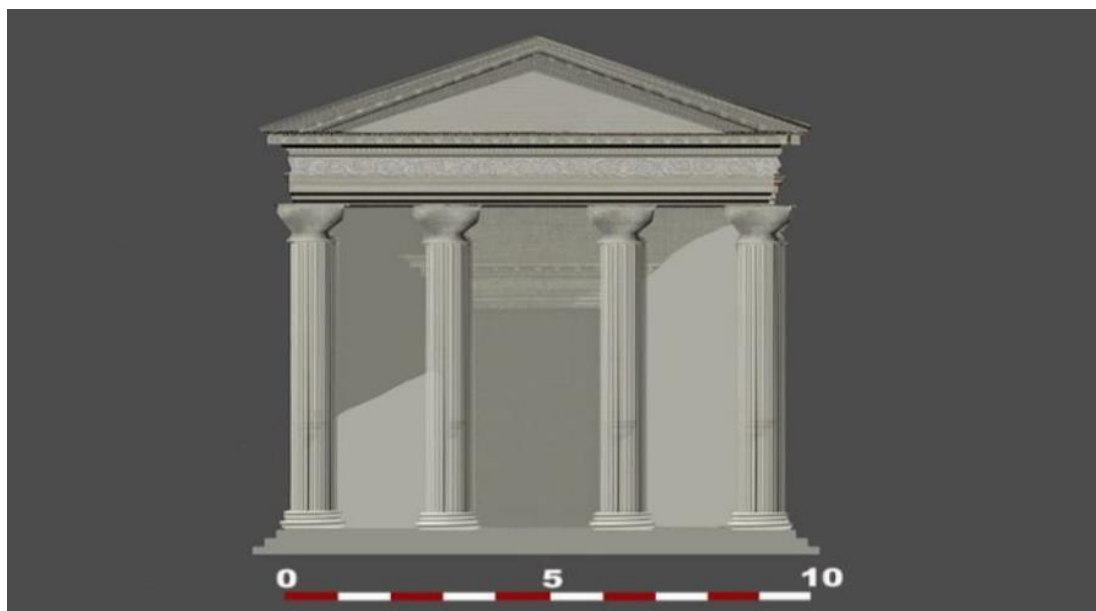


Figure 21 – 3D reconstruction of the portico of the Temple of Baalshamin (scale in m) (Source: Denker Ahmet)

Рисунок 21 – 3D-реконструкция портика храма Баальшамина (шкала в м) (Источник: Denker Ahmet)



Figure 22 – 3D reconstruction of the Temple of Baalshamin in Palmyra in accordance with historical records (Source: Denker Ahmet)

Рисунок 22 – 3D-реконструкция храма Баальшамина в Пальмире в соответствии с историческими записями (Источник: Denker Ahmet)

Monumental Arch (Triumphal Arch) of Palmyra

The monumental Arch of Palmyra or as it is otherwise called the Triumphal Arch (Fig. 23) was built at the end of the 2nd century during the reign of the Roman emperor Lucius Septimius Severus and belongs to Roman architecture [2]. It consists of three parts (entrances), to which the Great Colonnade Street adjoins. Structurally, it is located at an angle of 30° to the above-mentioned straight street (Fig. 24), which connects to the Temple of Bel. The middle part of the street is about 11 m wide, was not paved with flat stones and was used for driving animals and passing ancient vehicles. On the sides of the street, there were two covered porticos built of golden limestone and pink Aswan granite, the width of each portico is about 7 m. The diameter of the columns of the above-mentioned porticos was about 0.95 m, and their height was about 9.5 m. As of 2014, there are about 150 columns left. In 2015, the Monumental Arch was blown up by radical militants (Fig. 25). 3D reconstruction of the Monumental Arch is shown in Figures 26–28.



Figure 23– Monumental Arch (Triumphal Arch) of Palmyra, Syria, before destruction

Рисунок 23 – Монументальная арка (Триумфальная арка) Пальмиры, Сирия, до разрушения

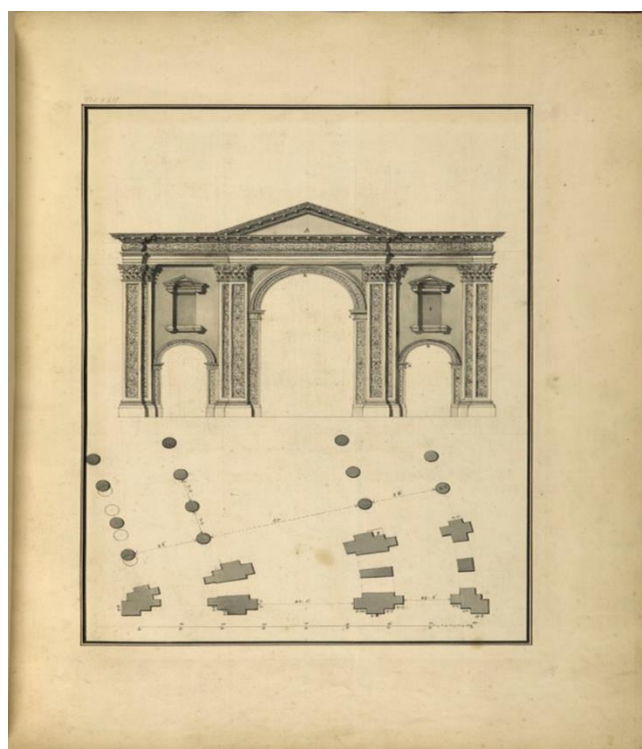


Figure 24 – Reconstruction of the plan and facade of the east side of the Monumental Arch of Palmyra, Syria (Author: Borra, Giovanni Battista, London, 1753)

Рисунок 24 – Реконструкция плана и фасада восточной стороны Монументальной арки в Пальмире, Сирия (Автор: Борра, Джованни Баттиста, Лондон, 1753)



Figure 25 – Destructions in the Monumental Arch of Palmyra

Рисунок 25 – Разрушения в Монументальной арке в Пальмире



Figure 26 – 3D of the destroyed Monumental Arch of Palmyra (Источник: Iconem)

Рисунок 26 – 3D разрушенной Монументальной арки в Пальмире (Source: Iconem)



Figure 27 – 3D Reconstruction of the Monumental Arch of Palmyra to the state before destruction in 2015 (Source: Arc/k project)

Рисунок 27 – 3D-реконструкция Монументальной арки в Пальмире до состояния перед разрушением в 2015 году (Источник: Arc/k project)

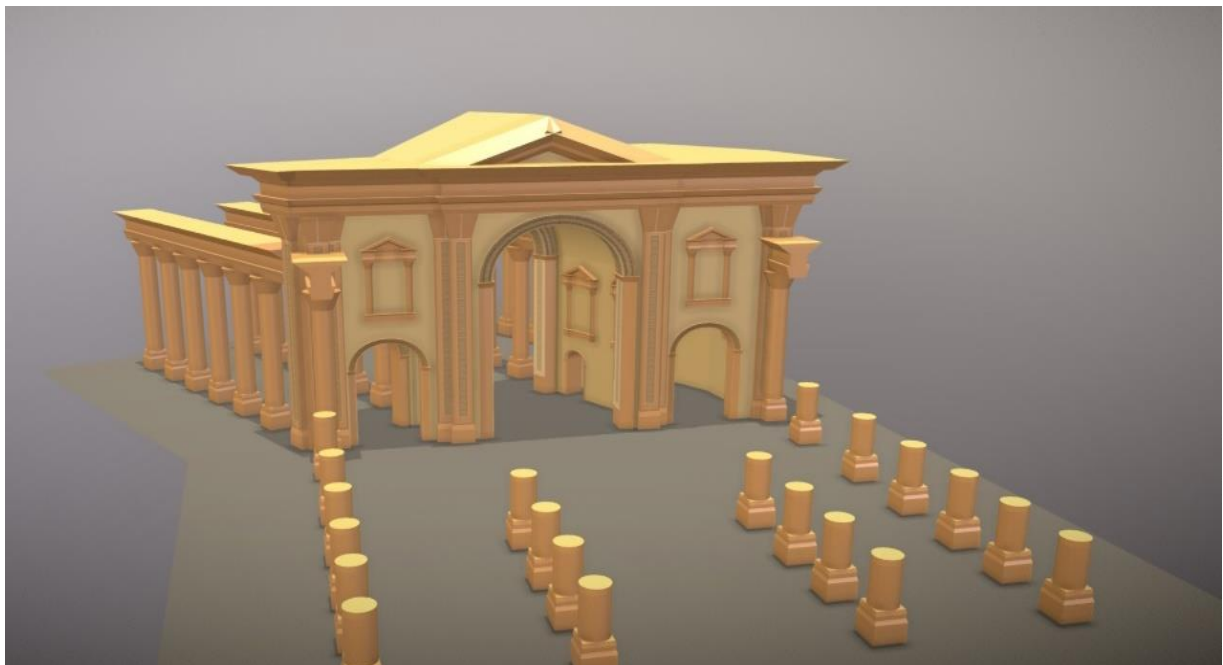


Figure 28 – Full 3D reconstruction of the Monumental Arch in Palmyra approximately in accordance with historical records (Source: SCADL & Co)

Рисунок 28 – Полная 3D-реконструкция Монументальной арки приблизительно в соответствии с историческими записями (Источник: SCADL & Co)

Monitoring, certification, and 3D modeling of other important facilities in Palmyra such as the Great Colonnade Street, the Tetrapylon, the Theater, and the Castle (Fig. 29–32) and others, which have been damaged since 2015, may be the subject of further research.



Figure 29 – The Great Colonnade Street in Palmyra in 2013

Рисунок 29 – Улица Большая колоннада в Пальмире в 2013 г.



Figure 30 – The Tetrapylon in Palmyra in 2009

Рисунок 30 – Тетрапилон в Пальмире в 2009 г.



Figure 31 – The Theater in Palmyra in 2015

Рисунок 31 – Театр в Пальмире в 2015 г.



Figure 32 – The Castle in Palmyra in 2015

Рисунок 32 – Замок в Пальмире в 2015 г.

Conclusions

- This study examined the most significant masterpieces of world architecture in Palmyra that existed for many centuries and were included in the UNESCO World Heritage List, disappeared, or partially disappeared overnight due to the inability of people to appreciate their past in order to have a better future;
- 3D models of the Temple of Baal (Bel), the Temple of Baalshamin and the Monumental (Triumphal) Arch were collected, which were practically destroyed as a result of the war;
- The presence of various projects of 3D models of Palmyra's architectural monuments created by various scientists and organizations will improve the accuracy of such models and bring them as close as possible to the original;
- The presence of many projects of 3D models created by various scientists and organizations will allow preserving the above-mentioned architectural monuments virtually and restoring them in the future;
- It is necessary to create 3D models of other significant objects of Palmyra such as Tetrapylon and Great Colonnade Street, etc., thereby continuing the research in this direction.

References

1. Afanas'eva V.K. et al. General history of architecture. In 12 volumes. Moscow: Stroyizdat, 1970, vol. 1, 512 p. [In Russian]
2. Amy Robert. Premieres restaurations de l'Arc monumental de Palmyre. In: Syria. Tome 14, fascicule 4, 1933. pp. 396–411. [In French]
3. Aruz Joan, et al. Palmyra: Mirage in the Desert, Publisher: The Metropolitan Museum of Art, New York, 2018.160 p.
4. Aseev Yu.S. et al. General history of architecture. In 12 volumes. Leningrad. Moscow: Stroyizdat, 1966, vol. 3, 687 p. [In Russian]
5. Auguste Choisy. History of architecture; trans. from Fr., add. and comment. V.D. Blavatsky / / under the general. editorship A.A. Sidorova and others. Moscow: Publishing House of the All-Union Acad. of Architecture, 1935, vol. 2, 694 p. [In Russian]
6. Belash T.A., Aldrebi Z. A. Analysis of the damage of the architectural monuments of Syria resulted from earthquakes and hostilities. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*. 2016, no. 5, pp. 58–63. [In Russian]
7. Bunny A., Al-As'ad kh. Palmyra. Story. Monuments. Museum. Translation from English Sedov A.V. Moscow: publishing house "The State Museum of the East", 2016, 208 p. [In Russian]
8. Bykov V.E. et al. General history of architecture. In 12 volumes. Moscow: Stroyizdat, 1973, vol. 2, 712 p. [In Russian]
9. Directorate-General of Antiquities and Museums (DGAM). Available at: URL: <http://dgam.gov.sy/> (accessed 12.05.2023).
10. Gros Pierre. "LE TEMPLE DE BÊL A PALMYRE." *Revue Archéologique*, no. 1, 1981, pp. 97–102. [In French]
11. Kersten T.P. et al. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogramm. Fernerkundung - Geoinf.* 2012, pp. 727–740.

12. Kersten T.P., & Lindstaedt, Moscow, 2012: Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. EuroMed 2012 – Int. Conference on Cultural Heritage. M. Ioannides et al. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012: pp. 1–10.
13. Kersten T.P., Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications. M. Ioannides et al. (Eds.). 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2006: pp. 207–214.
14. La collection numérique “Grands sites archéologiques” est produite par le musée d'Archéologie nationale-Domaine national de Saint-Germain-en-Laye Available at: URL: <https://archeologie.culture.gouv.fr/palmyre/fr/mediatheque> (accessed 13.05.2023).
15. Lapatin Kenneth, Rubina Raja (eds.), Palmyra and the East. 2022, 181 p. ISBN: 978-2-503-59825-3.
16. Remondino F. et al., Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25 (4), 2008, pp. 55–65.
17. Rubina Raja, Yon J.-B., Steding J. Steding. (eds.) Excavating Palmyra. Harald Ingholt's Excavation Diaries: A Transcript, Translation, and Commentary 2021, 2 vols, 1846 p. ISBN: 978-2-503-59531-3.
18. Sommer Michael. Palmyra: A History (Cities of the Ancient World), 1st Edition, Publisher: Routledge, 2020. 284 p. ISBN-13: 978-0367593940.
19. Veyne Paul, Palmyra: An Irreplaceable Treasure, Publisher: University of Chicago Press, 2017. 284 p. ISBN-13: 978-0226427829.
20. Vinogradov Yu.A., Vasiliev S.A., Stepanova K.N. (executive editors). The past of humankind as seen by the Petersburg archaeologists at the dawn of the millennium (To the Centennial of the Russian Academic Archeology). St. Petersburg: Petersburg Oriental Studies, 2019. 420 p.: ill. ISBN 978-5-85803-525-1. [In Russian]
21. Voronina V.L. et al. General history of architecture. In 12 volumes. Moscow: Stroyizdat, 1969, vol. 8, 491 p. [In Russian]

Список литературы

1. Афанасьева В.К. и др. Всеобщая история архитектуры. В 12 томах. М.: Стройиздат. 1970. Т. 1. 512 с.
2. Amy Robert. Premieres restaurations de l'Arc monumental de Palmyre. In: Syria. Tome 14 fascicule 4, 1933, pp. 396–411.
3. Aruz Joan, et al. Palmyra: Mirage in the Desert, Publisher: The Metropolitan Museum of Art, New York, 2018. 160 p.
4. Асеев Ю.С. и др. Всеобщая история архитектуры. В 12 томах. Ленинград. Москва: Стройиздат, 1966. Т. 3. 687 с.
5. Огюст Шуази. История архитектуры; пер. с фр., доп. и коммент. В. Д. Блаватского // Под общ. ред. А. А. Сидорова и др. Москва: Изд-во Всесоюзной акад. архитектуры 1935. Т. 2. 694 с.
6. Белаш Т.А., Альдреби З.А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2016. № 5. С.58–63.
7. Бунни А., Ал-Ас'ад Х. Пальмира. История. Памятники. Музей. перевод с английского Седов А. В. Москва: изд-во «Государственный музей Востока». 2016. 208 с. ISBN: 978-5-903417-93-3.

8. Быков В.Е. и др. Всеобщая история архитектуры. В 12 томах. Москва: Стройиздат. 1973. Т. 2. 712 с.
9. Directorate-General of Antiquities and Museums (DGAM) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://dgam.gov.sy/> (12.05.2023).
10. Gros Pierre. "LE TEMPLE DE BÉL A PALMYRE." *Revue Archéologique*, no. 1, 1981, pp. 97–102.
11. Kersten T.P. et al. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogramm. Fernerkundung - Geoinf.* 2012, pp. 727–740.
12. Kersten T.P., & Lindstaedt M., 2012: Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects. *EuroMed 2012 – Int. Conference on Cultural Heritage*. M. Ioannides et al. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Volume 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012: pp. 1–10.
13. Kersten T.P., Combination and Comparison of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for the Generation of Virtual Models in Cultural Heritage Applications. M. Ioannides et al. (Eds.). *7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, VAST 2006*: pp.207–214.
14. La collection numérique "Grands sites archéologiques" est produite par le musée d'Archéologie nationale-Domaine national de Saint-Germain-en-Laye Available at: URL: <https://archeologie.culture.gouv.fr/palmyre/fr/mediatheque> (accessed 13.05.2023).
15. Lapatin Kenneth, Rubina Raja (eds.), *Palmyra and the East*. 2022, 181 p., ISBN: 978-2-503-59825-3.
16. Remondino F. et al. Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*. 25 (4), 2008, pp. 55–65.
17. Rubina Raja, Yon J.-B., Steding J. Steding. (eds.) *Excavating Palmyra. Harald Ingholt's Excavation Diaries: A Transcript, Translation, and Commentary 2021*, 2 vols, 1846 p. ISBN: 978-2-503-59531-3.
18. Sommer Michael. *Palmyra: A History (Cities of the Ancient World)*, 1st Edition, Publisher: Routledge, 2020. 284 p. ISBN-13: †978-0367593940.
19. Veyne Paul. *Palmyra: An Irreplaceable Treasure*, Publisher: University of Chicago Press, 2017. 284 p. ISBN-13: †978-0226427829.
20. Виноградов Ю.А. Васильев С.А., Степанова К.Н. (ответственные редакторы). *Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии)*. СПб.: Петербургское Востоковедение. 2019. 420 с.: ил. ISBN 978-5-85803-525-1
21. Воронина В.Л. и др. Всеобщая история архитектуры. В 12 томах. Москва: Стройиздат, 1969. Т. 8. 491 с.

Information about author/ Информация об авторе

Ziad Ahmad ALDREBI, Ph.D. (in Civil Engineering), Researcher, Lecturer-researcher, Civil engineer, "Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University". Saint Petersburg, Russian Federation. E-mail: ziald67@gmail.com

Зиад Ахмад АЛЬДРЕБИ, канд. техн. наук, исследователь, преподаватель-исследователь, инженер-строитель. ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». Санкт-Петербург, Российская Федерация. E-mail: ziald67@gmail.com

УДК: 624.073.2:624.151.5:550.34.052:550.344.33

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-32-47)

Теоретические и экспериментальные исследования

Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция–грунт»

Чуркин Алексей Андреевич¹, Смирнов Игорь Дмитриевич^{1,2}

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, Российская Федерация

Аннотация: *Введение.* Метод анализа отклика в настоящий момент является одним из наиболее распространенных способов акустической экспресс-диагностики состояния фундаментных плит и других плитоподобных конструкций за рубежом, однако сравнительно мало распространен в Российской Федерации. Модификация данной методики, основанная на анализе параметров нормированного отклика, активно разрабатывается отечественными специалистами для оценки качества контакта конструкций с грунтовым основанием. Актуальным является вопрос выработки новых информативных параметров и критериев для выделения аномалий, связанных с нарушениями контакта.

Целью работы является информирование специалистов о возможностях метода анализа нормированного акустического отклика для локализации зон нарушения контакта конструкция-грунт. Для достижения поставленной цели предложено применить атрибут «индекс пустот» и вспомогательный критерий анализа данных, основанный на характере распределения значений атрибутов.

Материалы и методы. Описаны особенности методики анализа нормированного акустического отклика, применяемой для поиска участков нарушенного контакта «конструкция-грунт». Показан способ расчета атрибута «индекс пустот» для данной методики. Предложен критерий выделения аномальных областей, отталкивающийся от анализа характера распределения значений атрибутов.

Результаты. Верификация применения атрибута «индекс пустот» для поиска зоны нарушения контакта конструкции с грунтом показана на результатах обследования физической модели тоннельной обделки с известным положением пустоты. На примере результатов обследования плиты в основании подземной автостоянки показано использование «индекса пустот» совместно с атрибутом энергии нормированного сигнала. Предложен вспомогательный критерий анализа данных, дополняющий критерий «трех сигма», и основанный на характере распределения значений атрибутов.

Выводы. Показан способ применения атрибута «индекс пустот» для локализации зон нарушения контакта конструкция-грунт для метода анализа нормированного акустического отклика. Предложен вспомогательный критерий анализа данных, учитывающий характер распределения атрибутов отклика.

Ключевые слова: фундаментные плиты, неразрушающий контроль, техническая геофизика, метод анализа отклика, атрибутный анализ, индекс пустот

@ A.A. Churkin, I.D. Smirnov, 2023

Для цитирования: Чуркин А.А., Смирнов И.Д. Развитие методики анализа нормированного акустического отклика для оценки контакта «конструкция–грунт» // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 32–47.
DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-32-47)

Вклад автора

Авторы берут на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Theoretical and experimental studies

Development of normalized acoustic response analysis for soil-structure contact state evaluation

Alexey A. Churkin¹, Igor D. Smirnov^{1,2}

¹Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation

Abstract: Introduction. Impulse response testing is currently one of the most common methods of acoustic express diagnostics of the foundation slabs and other plate-like structures state, but is relatively uncommon in the Russian Federation. A modification of this technique, based on the analysis of normalized response parameters, is being actively developed by Russian specialists to assess the quality of soil-structure contact. The issue of developing of the new informative parameters and criteria for identifying of anomalies associated with contact violations is topical.

Aim. The purpose of the work is to inform specialists about the capabilities of the normalized acoustic response analysis method for localizing zones of soil-structure contact violation. It is proposed to apply the attribute "void index" and an auxiliary criterion for data analysis based on the nature of the distribution of attribute values.

Materials and methods. The features of the normalized acoustic response testing methodology for soil-structure contact violations searching are described. The method for calculating the attribute "void index" for the data of the technique is shown. A criterion for the selection of anomalous areas is proposed, based on the data analysis of the nature of the distribution of attribute values.

Results. Verification of the "void index" attribute application for searching for zones of soil-structural contact violation is shown on the results of a survey of a tunnel liner physical model with a known position of the void. An example of the results of a survey of a slab at the base of an underground car park shows the use of a "void index" in conjunction with the normalized signal energy attribute. A method for statistical processing of the results is proposed, which supplements the traditionally used "three sigma" criterion.

Conclusions. A method of the "void index" attribute application to localize zones of soil-structure contact violation for the normalized acoustic response analysis method is shown. A method for statistical data processing is proposed, considering the nature of the distribution of response attributes.

Keywords: foundation slabs, nondestructive testing, technical geophysics, impulse response testing, attribute analysis, void index

For citation: Churkin A.A., Smirnov I.D. Development of normalized acoustic response analysis for soil-structure contact state evaluation. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 32–47. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-2-32-47](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-2-32-47)

Author contribution statement

The authors take responsibility of all aspects of the article preparation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Применение геофизических методов для исследования геотехнических конструкций обозначают термином «техническая геофизика» [1, 2]. При диагностике состояния фундаментных плит и других плитоподобных конструкций (обделка тоннелей и шахтная крепь, подпорные стены и др.) геофизика применяется для решения двух взаимосвязанных задач: оценки состояния материала (толщина, армирование, сплошность и т.д.) и оценки качества контакта с грунтовым основанием/вмещающими грунтами [3, 4]. Оба этих вопроса касаются сферы безопасности эксплуатируемых сооружений и могут вносить коррективы в прогноз их реакции на сейсмические воздействия. Своевременное выделение дефектов плитоподобных конструкций или областей нарушения их контакта с грунтом способно помочь в планировании ремонтно-восстановительных работ.

Среди множества методов геофизики для решения данных задач наиболее широкое распространение получили георадиолокационное профилирование (ground penetrating radar) [5–7] и сейсмоакустические методы: импакт-эхо метод (impact-echo testing) [4, 7, 8] и метод анализа отклика (impulse response testing).

Метод анализа отклика (вибраакустический метод) получил распространение за рубежом, однако сравнительно мало применяется в Российской Федерации [10–14], в основном для контроля качества тампонажа заобделочного пространства тоннелей [15–16]. Модификация методики, основанная на анализе параметров нормированного отклика, активно разрабатывается отечественными специалистами [12].

В рамках развития метода актуальны два направления – выработка новых информативных параметров и определение критериев для выделения акустических аномалий, связанных с нарушениями контактных условий. Применение параметра «индекс пустот» / "void index" при обработке данных и выделение аномального отклика при бимодальном характере распределения атрибутов в качестве возможного критерия предлагается обсудить в материале.

Методы исследования

Метод анализа отклика (вибраакустический метод) применяется для обнаружения нарушений контакта конструкции с грунтом. В основе метода лежит явление возникновения аномальных колебательных процессов в системе конструкция–грунт при ударно-акустическом воздействии.

При возбуждении низкочастотных колебаний в плите основными параметрами, характеризующими эффективность работы грунта основания в качестве демпфера,

являются продолжительность и амплитудно-частотный состав основного цуга колебаний [12] (рис. 1). Их аномальное изменение связывается с нарушением контакта (наличием зоны разуплотнения, пустоты или каверны) или неоднородностью материала (наличием неравномерно набравшего прочность бетона, бетона повышенной пористости и трещиноватости, расслоения) [15].

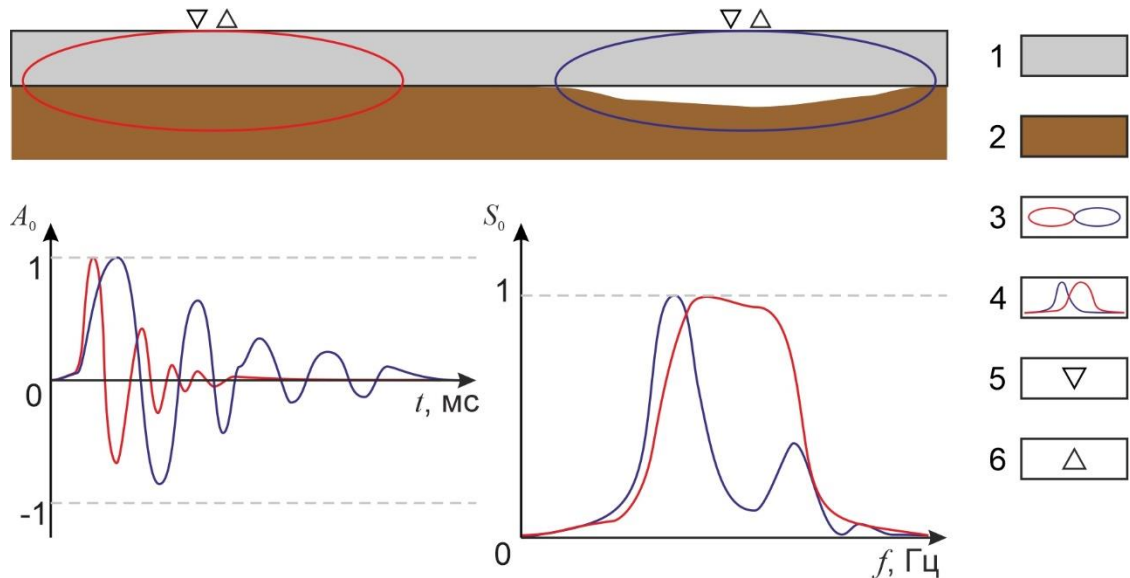


Рисунок 1 – Принципиальная схема метода анализа нормированного акустического отклика. Обозначения: 1 – конструкция, 2 – грунт, 3 – объем среды, вовлеченный в колебание, 4 – идеализированный отклик во временной и частотной области, 5 – источник, 6 – приемник

Figure 1– Schematic diagram of the normalized acoustic impulse response testing. Legend: 1 – structure, 2 – soil, 3 – medium volume involved in the oscillation, 4 – idealized response in the time and frequency domain, 5 – source, 6 – receiver

Метод анализа нормированного отклика состоит в сравнении взаимного поведения ряда атрибутов – энергии нормированного сигнала E_n (определяется во временной области), площади нормированного спектра S_n и средневзвешенной частоты f_s (рассчитываются в частотной области). Критерий выделения аномального отклика предполагает, что росту E_n для аномальной точки соответствует снижение S_n и f_s [12]. Практический опыт применения методики показал, что средневзвешенная частота обладает малой устойчивостью к акустическим помехам различного происхождения. Поэтому необходимо дополнение энергии и площади спектра атрибутом, реагирующим на рост вклада низкочастотных (изгибных) колебаний в отклик.

Комплект атрибутов можно дополнить за счет параметров, применяемых в других модификациях метода, в первую очередь методике анализа мобильности (mobility response testing). При использовании в качестве источника молотка с датчиком силы взаимодействие конструкции с основанием описывается т.н. кривой мобильности $Mobility(f) = Signal(f)/Force(f)$ (mobility curve, «спектр механического адмиттанса»), где $Signal(f)$ – спектр зарегистрированного сигнала, $Force(f)$ – спектр силовой характеристики ударного импульса, записанный датчиком. Основными атрибутами для кривой мобильности являются [9, 10, 14]:

- среднее значение мобильности в частотном диапазоне 100–800 Гц M_{av} ;
- угол наклона кривой мобильности в полосе частот 0–40 Гц, т.н. «динамическая

жесткость» K_d ;

- угол наклона линии тренда (линейной регрессии) для кривой мобильности в частотном диапазоне 100–800 Гц M_p/N ;
- отношение пикового значения кривой мобильности в полосе частот 0–100 Гц к M_{av} , т.н. «индекс пустот».

Последний из параметров представляет интерес для оценки вклада низкочастотных колебаний в отклик и рекомендован стандартом ASTM C1740 для выделения областей расслоения бетона и нарушений контакта конструкция-грунт. Возможности адаптации параметра для методики анализа нормированного отклика способствует то, что его значение не связано напрямую с абсолютным значением мобильности, в отличие от других атрибутов.

Важным вопросом при применении метода анализа отклика является планирование сети наблюдений и определение минимального количества точек исследования. Сводная информация по оценкам оптимальных параметров для методики анализа мобильности собрана в [9]. Регистрация в полевых условиях массива сигналов с корректной сетью наблюдений не решает вопроса выбора критериев выделения аномального отклика.

Предложенный в [12] критерий «трех сигма» является достаточно жестким и требует ручной проверки корректности его применения при разделении данных [13]. Представляется необходимым учитывать при анализе характер распределения значений атрибутов для коррекции пороговых значений выделения аномалий.

Геофизические атрибуты не всегда имеют нормальный характер распределения (например, сопротивление в электроразведке имеет логнормальный характер) [17]. Для удобства визуального анализа полезно применять различные преобразования к данным. Распределение параметра может носить мультимодальный характер, каждая мода характеризует свою особенность предмета изучения [18]. На практике моды не всегда хорошо разделены даже для достаточно больших выборок [19]. Поэтому в каждом конкретном случае окончательные выводы по характеру и оценке параметров распределения должны приниматься интерпретатором [20].

Показанные в статье результаты получены с использованием измерителей длины свай первого и второго поколений, ИДС-1 и ИДС-2 («Логические системы», Россия). Рабочие комплекты приборов включали блоки управления и регистрации данных, датчик колебаний – стандартный велосиметр либо датчик GTSensor (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия), набор ударных источников (параметры ударников указаны в тексте).

Обработка результатов осуществлялась в программном обеспечении GeoTechControl (ООО «ГЕОДЕВАЙС», Россия). Использованный граф обработки включал сборку и сортировку сигналов в один массив данных с присвоением пространственной геометрии и удалением некондиционных сигналов; расчет атрибутов энергии нормированного отклика, площади нормированного спектра, средневзвешенной частоты для каждой трассы с последующим расчетом среднеарифметических атрибутов для каждой точки наблюдений. Расчет атрибута «индекс пустот» для массива данных осуществлялся с применением скрипта, написанного на языке Python.

Результаты

Проиллюстрируем применение атрибута «индекс пустот» для набора данных, полученного при исследовании модельного кольца бетонной обделки толщиной 250 мм. С внешней стороны кольца оборудовалась щель между бетоном и грунтом. Более подробное описание модели дано в [12]. На внутренней поверхности кольца были равномерно распределены 32 точки наблюдений. Пустота в заобделочном пространстве располагалась между точками 19 и 29. Вблизи от точки 26 располагался разрыв в сегменте обделки. Для

возбуждения сигнала помимо резиновой киянки весом 400 г использовался металлический молоток с весом бойка 70 г.

Результаты обработки показывают, что для обоих ударных источников по «индексу пустот» выделяется зона нарушения сплошности обделки. Наличие пустоты в заобделочном пространстве хорошо коррелирует с ростом медианного значения атрибута в 2 и более раз. Результаты, полученные для низкочастотного воздействия киянки, лучше подчеркивают действительные границы зоны нарушения контакта (рис. 2).

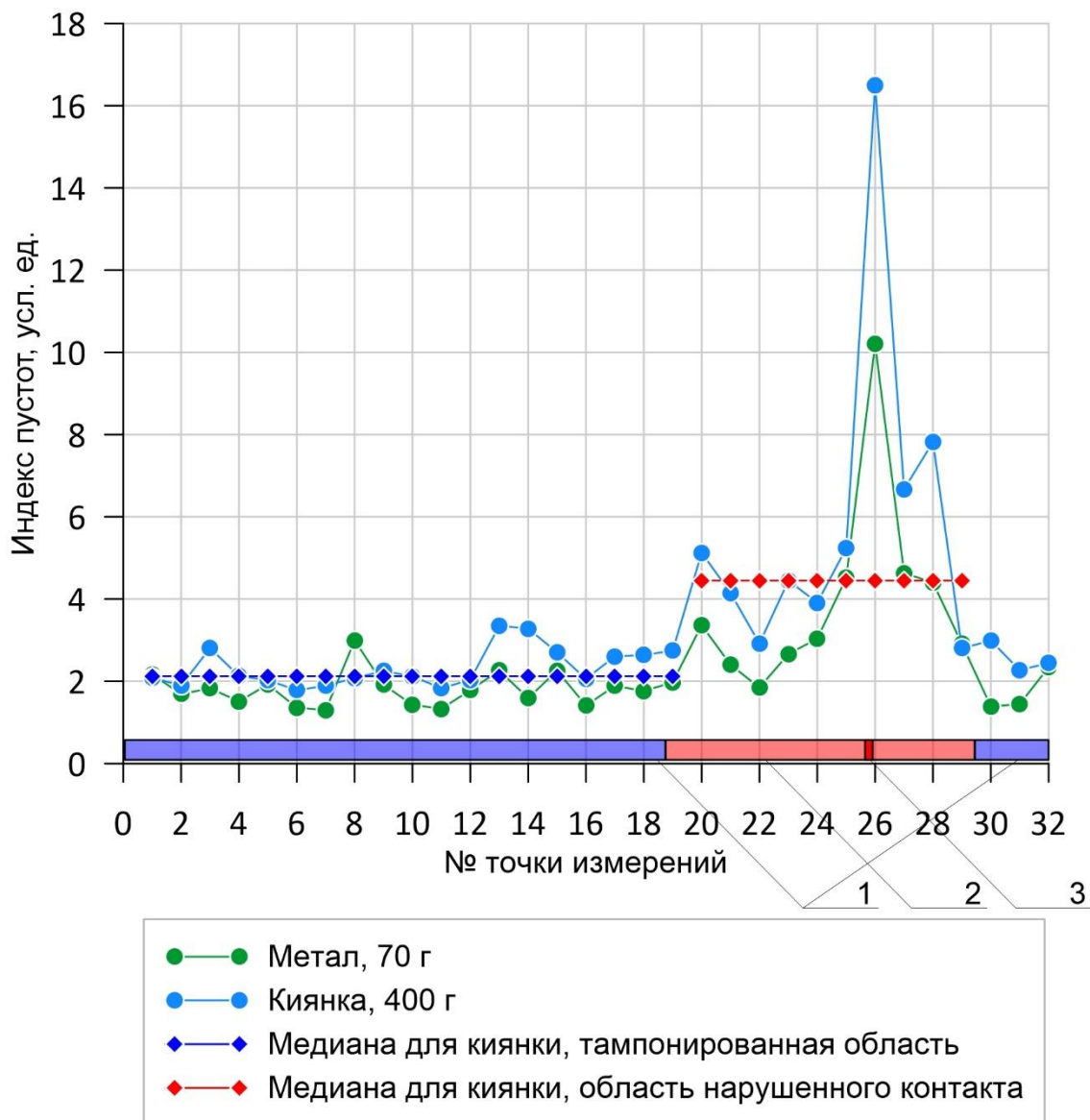


Рисунок 2 – Применение «индекса пустот» для данных, полученных на физической модели с известным положением пустоты в заобделочном пространстве: 1 – тампонирующая область, 2 – область нарушенного контакта, 3 – нарушение сплошности бетона обделки

Figure 2 – Application of the "void index" for data obtained on a physical model with a known position of the void behind liner: 1 – grouted area, 2 – area of loose contact, 3 – lining integrity defect

Показав чувствительность «индекса пустот», рассчитываемого для нормированного отклика, к наличию пустот и дефектов, рассмотрим результаты обследования монолитного покрытия мощностью 150 мм в основании подземного паркинга. Исследование выполнялось с целью локализации зон нарушения контакта «покрытие-грунт засыпки». В ходе работ по обустройству дренажной системы на объекте было выявлено несколько участков нарушенного контакта.

Для возбуждения сигнала использовалась резиновая киянка весом 1000 г (рис. 3а). Привязка сети наблюдений осуществлялась с применением лазерного дальномера (рис. 3б). Точки обследования располагались на удалении 0,5–1,0 м от стен, границ подколонных ростверков, дренажных приемков и других участков с потенциально аномальным откликом. В ходе проведения исследований выполнено 1140 точек акустического обследования (рис. 3с).

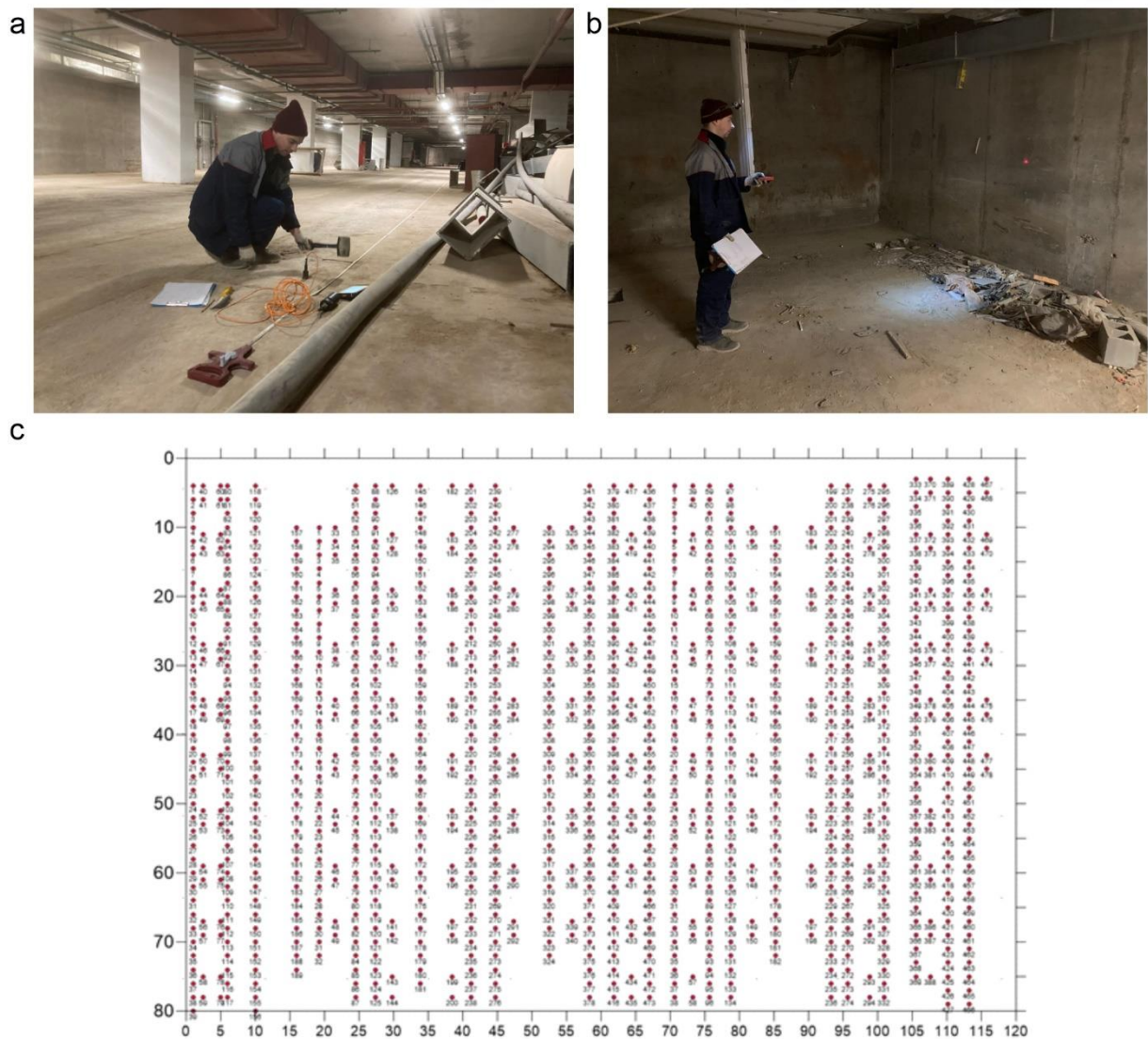


Рисунок 3 – Процесс обследования: *a* – измерения методом анализа отклика, *b* – привязка точек измерения, *c* – план-схема сети наблюдений

Figure 3 – Survey process: *a* – binding of measurement points, *b* – impulse response testing, *c* – plan-scheme of the observation network

Результаты обработки данных представлены на рис. 4 в виде карт распределения атрибутов энергии нормированного сигнала и индекса пустот. Для локализации нарушений контакта был использован критерий однократного (аномалия, «ослабленный контакт») и двукратного (сильная аномалия, «нарушенный контакт») превышения стандартного отклонения σ для атрибутов.

Способ расчета «индекса пустот» был изменен по результатам выборочного визуального анализа сигналов. Для точек со стабильным акустическим откликом сигнал быстро затухает во временной области (до 15 мс), его центральная частота совпадает с центральной частотой источника (400 Гц) (рис. 5, а). Для точек с нестабильным откликом время затухания основного цуга колебаний заметно растет (до 40 миллисекунд), центральная частота сигнала составляет около 200 Гц, частоты источника в спектре не выделяются (рис. 5, б). Наибольший интерес для анализа представляют точки с «промежуточным» характером отклика (рис. 5, с). Сигнал затухает на временах около 20–30 мс, центральная частота в спектре смещена в низкочастотную область, однако все еще прослеживается частота источника. Такой отклик может соответствовать области ослабления контакта.

Для всего массива зарегистрированных сигналов низкочастотные пики в спектре в основном располагались в интервале 50–200 Гц, а не в интервале 0–100 Гц. Поэтому окна расчета «индекса пустот» были изменены следующим образом: максимальная амплитуда нормированного спектра – 0–200 Гц, медианное значение нормированного спектра – 200–800 Гц.

Акустический отклик плиты в целом ведет себя неоднородно (коэффициент вариации для атрибута E_n составил 30%), однако анализ согласно критерию трех сигма дает возможность локализовать несколько областей аномального поведения отклика. Стоит отметить, что аномалии, расположенные вдоль 40 м по оси Y, связаны с особенностями конструктива (это ось организации дренажных приемков и отходящих от них каналов) и не выделялись в качестве аномальных.

Заметно, что границы аномальных областей, выделенные согласно критерию, различаются для энергии и «индекса пустот». На рост E_n влияют не только низкочастотные, но и высокочастотные помехи, в то время как «индекс» связан с относительным ростом низкочастотной области спектра. Это позволяет перейти к вопросу выбора критерия для разделения зон аномального и нормального отклика.

Для рассматриваемых выборок атрибутов, рассчитанных по 1140 точкам наблюдений, значения атрибута для случаев стабильного отклика (нормального контакта) и нестабильного отклика (ослабленного или нарушенного контакта) распределены различным образом. На суммарной гистограмме распределения мы имеем два различных события, объединенных вместе. Сложность определения порогового значения атрибута между нарушенным и ненарушенным контактом заключается в том, что распределения пересекаются в области точек с «промежуточным» характером отклика.

Для рассчитанных атрибутов построены гистограммы распределения (рис. 6, а, с). Распределение обоих параметров имеет ассиметричный характер и не является нормальным. После применения операции натурального логарифма к данным форма гистограмм стала более симметричной (рис. 6, б, d).

На гистограмме «индекса пустот» появилась возможность выделить пик второй моды. По итогам визуального анализа был выбран следующий критерий: значения, превышающие второй пик распределения, приняты в качестве аномальных; интервал от предполагаемой зоны пересечения мод (минимум гистограммы между пиками) до второго пика может соответствовать ослаблению контакта (промежуточный отклик). Определенные при визуальном анализе граничные значения затем были пересчитаны обратным преобразованием в исходное пространство значений (возведение экспоненты в степень граничного значения).

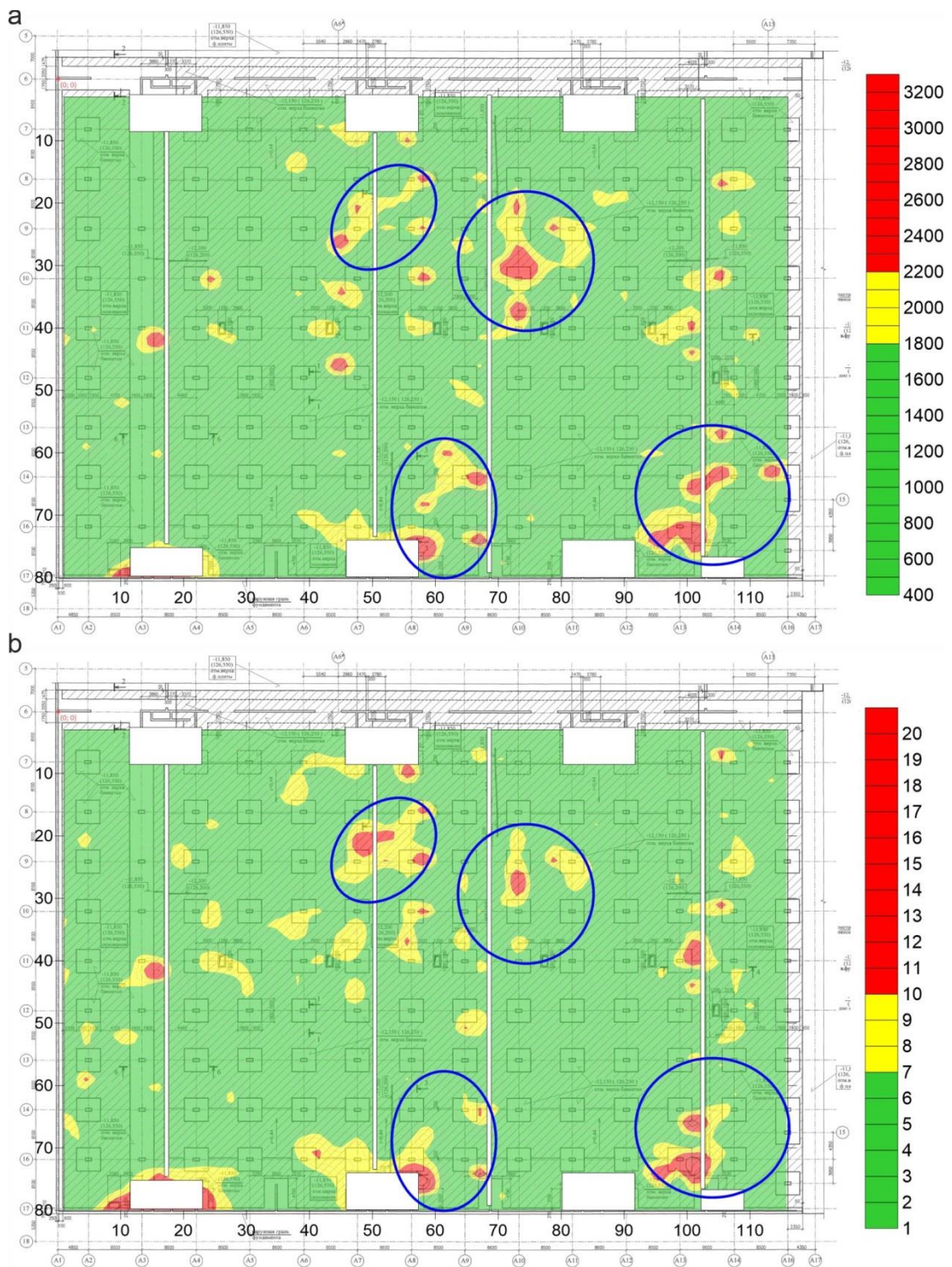


Рисунок 4 – Карты атрибутов E_n (a) и «индекса пустот» (b) с выделенными зонами аномального отклика согласно критерию «трех сигма»

Figure 4 – Attribute maps of E_n (a) and “void index” (b) with highlighted areas of anomalous response according to the “three sigmas” criterion

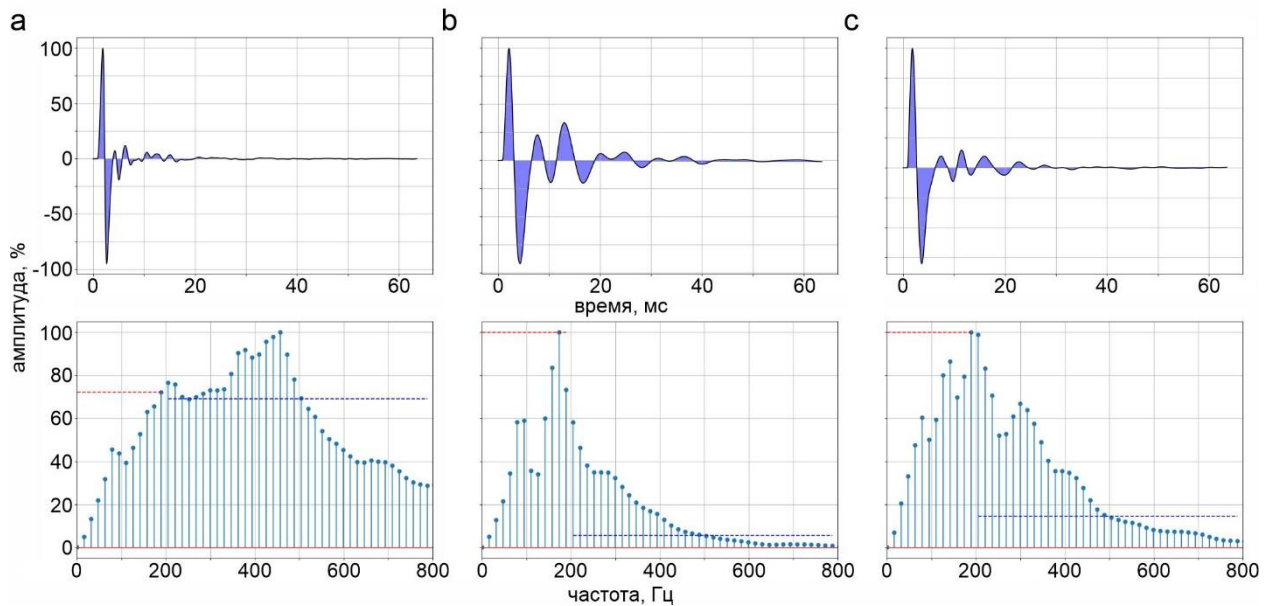


Рисунок 5 – Характерные примеры поведения отклика конструкции: *a* – стабильный отклик; *b* – нестабильный отклик; *c* – промежуточный по поведению отклик. Обозначения: красная пунктирная линия – максимальная амплитуда нормированного спектра в окне (0, 200) Гц, синяя пунктирная линия – медианное значение нормированного спектра в окне (200, 800) Гц

Figure 5 – Typical examples of structure response behavior: *a* – stable response; *b* – unstable response; *c* – intermediate behavioral response. Legend: the red dotted line – maximum amplitude of the normalized spectrum in the (0, 200) Hz, the blue dotted line – median value of the normalized spectrum in the (200, 800) Hz

Гистограмма энергии нормированного сигнала после преобразования стала чуть более симметричной, разделения мод нормального и аномального отклика в явном виде не произошло. В качестве граничной отсечки было выбрано значение, для которого предположительно проявляется вторая мода (асимметрия правой части гистограммы относительно основного пика). Пороговое значение, которое бы соответствовало промежуточному отклику (ослабление контакта), в отличие от гистограммы логарифма «индекса пустот», выделить не удалось.

На рис. 7 представлены карты распределения атрибутов с цветовой шкалой, соответствующей пороговым значениям, определенным при визуальном анализе гистограмм. Ранее выделенные области аномального отклика теперь имеют более четкий контур. Помимо этого, выделено несколько дополнительных аномальных областей. Карты энергий и индекса пустот согласуются между собой. Визуальный анализ сигналов для выделенных дополнительных областей показал, что карта «индекса пустот» с переопределенными значениями более точно описывает границы зон аномального отклика.

Необходимо отметить, что карты атрибутов отклика и выделенные на них аномальные области – это все еще результат обследования конструкции косвенным геофизическим методом. Только после применения прямых способов верификации (бурение, эндоскопия, зондирование и др.) и оценки согласованности акустических аномалий с действительными дефектами полученные карты атрибутов становятся инструментом планирования мероприятий по устранению зон с ослабленным или нарушенным контактом «плита–грунт».

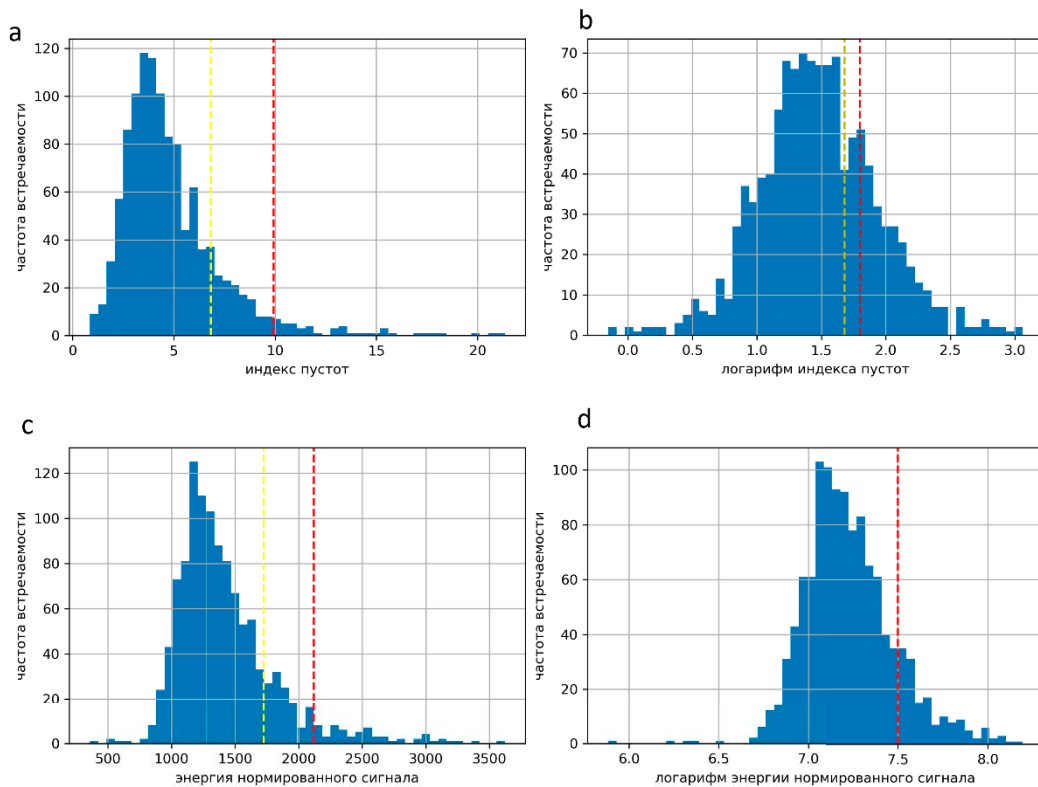


Рисунок 6 – Гистограмма распределения индекса пустот (а), гистограмма распределения логарифма индекса пустот (b), гистограмма распределения энергии нормированного сигнала (с), гистограмма распределения логарифма энергии нормированного сигнала (d). На исходных гистограммах желтая и красная пунктирные линии соответствуют критерию трех сигма. На преобразованных гистограммах желтая линия – точка пересечения распределений, красная линия – пик второй моды

Figure 6 – Histogram of “void index” distribution (a), logarithm distribution histogram of “void index” (b), normalized signal energy distribution histogram (c), normalized signal energy logarithm distribution histogram (d). On the original histograms the yellow and red dotted lines correspond to the three-sigma criterion. On the transformed histograms, the yellow line is the intersection point of the distributions, the red line is the peak of the second mode

Заключение

На примере данных физического моделирования и обследования плиты подземного паркинга показана применимость атрибута «индекс пустот» для обработки данных метода анализа нормированного акустического отклика. Параметр чувствителен к аномалиям, интерпретируемым в качестве проявлений нарушения контактных условий.

Предложен критерий выбора пороговых значений, отталкивающийся от характера распределения значений атрибута. Критерий не является универсальным, однако для случая двухмодального распределения выборки показал свою эффективность и может применяться совместно с критерием «трех сигма».

Требует дополнительного исследования ряд вопросов. Индекс пустот является вспомогательным атрибутом, расчет которого возможно необходимо подстраивать под конкретную задачу, оптимальным образом выбирая методику расчета. Выбор способа статистической обработки данных также требует вмешательства интерпретатора и предварительного определения характера распределения атрибутов.

Предложенные дополнения к стандартной методике анализа нормированного акустического отклика требуют дальнейшей оптимизации и проверки на эмпирических данных для возможности включения их в стандартный граф работы с данными.

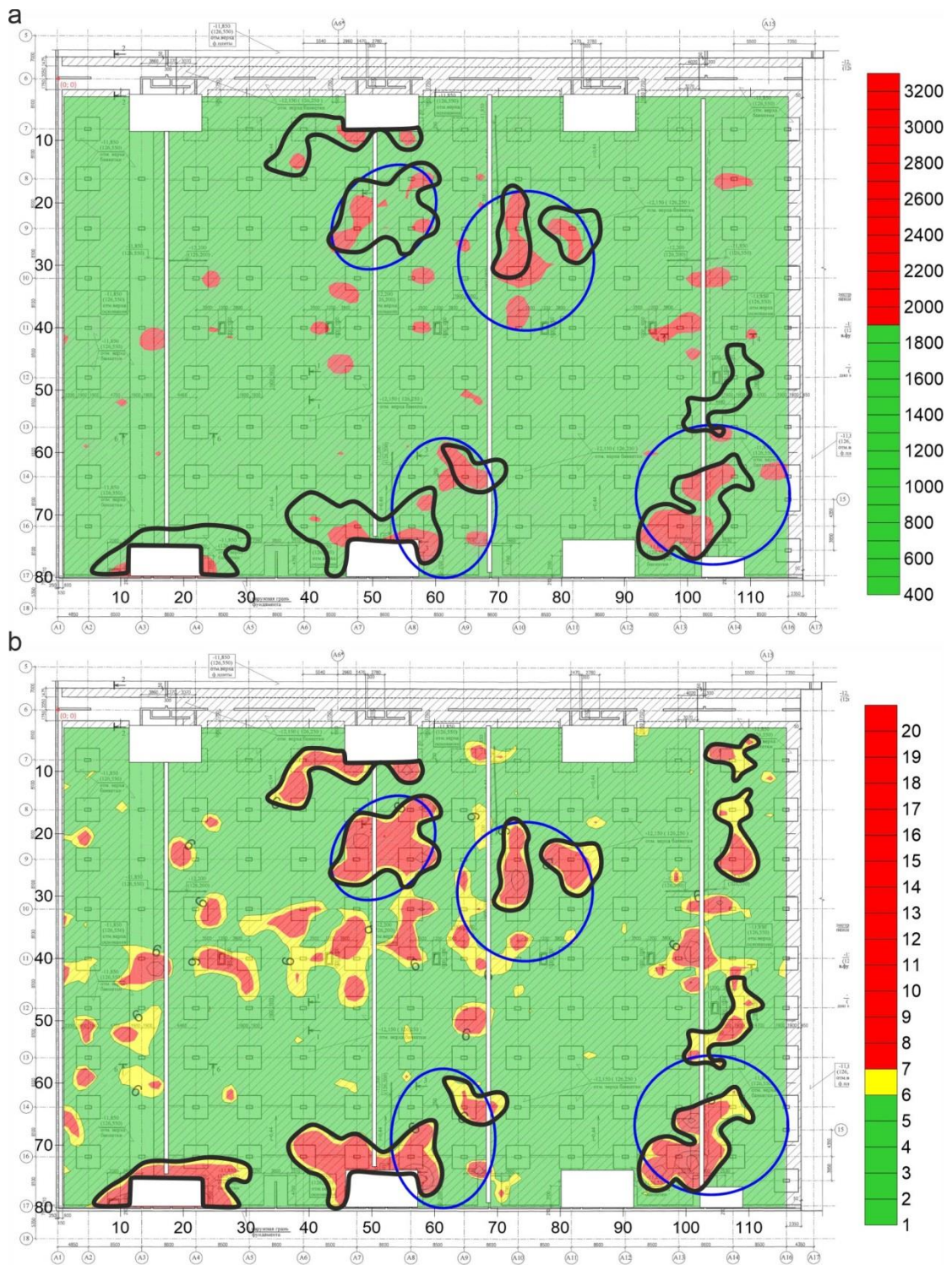


Рисунок 7– Карты атрибутов E_n (а) и «индекса пустот» (б) с выделенными зонами аномального отклика согласно критерию анализа гистограмм распределения

Figure 7– Attribute maps of E_n (a) and “void index” (b) with highlighted areas of anomalous response according to the distribution histogram analysis criterion

Список литературы

1. Капустин В.В., Владов М.Л. Техническая геофизика. Методы и задачи // *Геотехника*. 2020. Т. 12. № 4. С. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85.
2. Чуркин А.А., Капустин В.В., Конюхов Д.С., Владов М.Л. Последние изменения в российской практике нормативного регулирования «технической» геофизики // *Геотехника*. 2021. № 2. С. 56–70. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70.
3. Опыт использования геофизических методов для оценки фактических конструктивных параметров железобетонных фундаментных плит / Д.И. Блохин, А.С. Вознесенский, И.И. Кудинов и др. // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 2. С. 283–289.
4. Sadowski L. Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors. *Applied Sciences*, 2017, vol. 9, no. 7, article no. 893. DOI: 10.3390/app7090893.
5. Xie X., Liu Y., Huang H., Du J., Zhang F., Liu L., 2007. Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China. *Journal of Geophysics and Engineering*. Vol. 4, no. 3, pp. 253–261. DOI: 10.1088/1742-2132/4/3/S03.
6. Капустин В.В., Чуркин А.А., Ширококов М.П. Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // *Геотехника*. 2021. № 1. С. 68–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79.
7. Капустин В.В., Ширококов М.П. Применение георадарных технологий при обследовании подводных конструкций гидротехнических сооружений // *Геотехника*. 2021. Т. 13. № 3. С. 54–65. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-3-54-65.
8. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T., 2009. Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE. *NDT & E International*, vol. 42, no. 8, pp. 678–689. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.06.001.
9. Sajid S., Chouinard L. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review. *Construction and building materials*. 2019, vol. 211, pp. 129–140, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174.
10. Tang H., Long S., Li T., 2019. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*, vol. 228, article no. 116762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. Dodge E.C., Chapa S.V., 2015. Impulse response testing – analysis of relative test data. *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, September, 2015.
12. Чуркин А.А., Хмельницкий А.Ю., Капустин В.В. Оценка условий контакта конструкций с грунтовым массивом по атрибутам нормированного акустического отклика // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2022. № 5. С. 17–21.
13. Володин Г.В., Капустин В.В. Анализ колебаний фундаментных плит для оценки контакта с грунтами // *Геотехника*. 2021. Т. 13. № 4. С. 64–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-4-64-79.
14. Ottosen N.S., Ristinmaa M., Davis A.G. Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures. *J. Eng. Mech.* 2004, no. 9, pp. 1062–1071, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1062).
15. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Комплексные обследования бетонных и железобетонных обделок транспортных тоннелей ультразвуковым и ударно-акустическим методами // *Транспортное строительство*. 2014. № 5. С.12–14.

16. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel survey using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, no. 70, pp. 254–261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010.
17. Модин И.Н., Шевнин В.А. Соответствие данных электроразведки логнормальному закону распределения // *Прикладная геофизика*. Выпуск 109. Москва: Издательство «Недра». 1984. С. 75–82.
18. Ллойд Э., Эдерман У. Справочник по прикладной статистике. Том 1. Москва: «Финансы и статистика». 1989. 511 с.
19. Нерадовский Л.Г. Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада» // *Вестник евразийской науки*. 2021. Т. 13. № 6. DOI: 10.15862/25ECVN621
20. Шейнин В.И., Дзагов А.М. Использование логнормального распределения при обработке результатов испытаний грунтов сваями // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021. № 3. С. 2–5.

References

1. Kapustin V.V., Vladov M.L. Tekhnicheskaya geofizika. Metody i zadachi. *Geotekhnika*. 2020, vol. 12, no. 4, pp. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85. [In Russian]
2. Churkin A.A., Kapustin V.V., Konyuhov D.S., Vladov M.L. Poslednie izmeneniya v rossijskoj praktike normativnogo regulirovaniya «tekhnicheskoj» geofiziki. *Geotekhnika*. 2021, no. 2, pp. 56–70, DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-2-56-70. [In Russian]
3. Opyt ispol'zovaniya geofizicheskikh metodov dlya ocenki fakticheskikh konstruktivnykh parametrov zhelezobetonnykh fundamentnykh plit / D.I. Blohin, A.S. Voznesenskij, I.I. Kudinov i dr. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2011, no. 2, pp. 283–289. [In Russian]
4. Sadowski L. Multi-Scale Evaluation of the Interphase Zone between the Overlay and Concrete Substrate: Methods and Descriptors. *Applied Sciences*, 2017, vol. 9, no. 7, article no. 893. DOI: 10.3390/app7090893.
5. Xie X., Liu Y., Huang H., Du J., Zhang F., Liu L., 2007. Evaluation of grout behind the lining of shield tunnels using ground-penetrating radar in the Shanghai Metro Line, China. *Journal of Geophysics and Engineering*. Vol. 4, no. 3, pp. 253–261. DOI: 10.1088/1742-2132/4/3/S03.
6. Kapustin V.V., Churkin A.A., Shirobokov M.P. Opyt primeneniya georadiolokacii dlya kontrolya kachestva fundamentnykh plit. *Geotekhnika*. 2021, no. 1, pp. 68–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79. [In Russian]
7. Kapustin V.V., Shirobokov M.P. Primenenie georadarnykh tekhnologij pri obsledovanii podvodnykh konstrukcij gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. *Geotekhnika*. 2021, vol. 13, no. 3, pp. 54–65. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-3-54-65. [In Russian]
8. Cheng C.-C., Yu C.-P., Liou T., 2009. Evaluation of interfacial bond condition between concrete plate-like structure and substrate using the simulated transfer function derived by IE. *NDT & E International*, vol. 42, no. 8, pp. 678–689. DOI: 10.1016/j.ndteint.2009.06.001.
9. Sajid S., Chouinard L. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review. *Construction and building materials*. 2019, vol. 211, pp. 129–140, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174.

10. Tang H., Long S., Li T., 2019. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis. *Construction and Building Materials*, vol. 228, article no. 116762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.
11. Dodge E.C., Chapa S.V., 2015. Impulse response testing – analysis of relative test data. *Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, Berlin, Germany, September, 2015.
12. Churkin A.A., Khmel'nitsky A.Yu., Kapustin V.V. Evaluation of soil-structure contact state by normalized acoustic response analysis. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022, no. 5, pp. 453–458. DOI: 10.1007/s11204-022-09836-1
13. Volodin G.V., Kapustin V.V. Analiz kolebanij fundamentnyh plit dlya ocenki kontakta s gruntami. *Geotekhnika*. 2021, vol. 13, no. 4, pp. 64–79. DOI: 10.25296/2221-5514-2021-13-4-64-79. [In Russian]
14. Ottosen N.S., Ristinmaa M., Davis A.G. Theoretical Interpretation of Impulse Response Tests of Embedded Concrete Structures. *J. Eng. Mech.* 2004, no. 9, pp. 1062–1071, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:9(1062).
15. Shilin A.A., Kirilenko A.M., Znajchenko P.A. Kompleksnye obsledovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh obdelok transportnyh tonnelej ul'trazvukovym i udarno-akusticheskim metodami. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2014, no. 5, pp. 12–14. [In Russian]
16. Voznesenskii A.S., Nabatov V.V. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel survey using the impulse-response method. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2017, no. 70, pp. 254–261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010.
17. Modin I.N., Shevnin V.A. Sootvetstvie dannyh elektrorazvedki lognormal'nol'nomu zakonu raspredeleniya. *Prikladnaya geofizika*. Vypusk 109. Moskva: Izdatel'stvo «Nedra». 1984, pp. 75–82. [In Russian]
18. Llojd E., Ederman U. Spravochnik po prikladnoj statistike. Tom 1. Moskva: «Finansy i statistika». 1989. 511 p. [In Russian]
19. Neradovskij L.G. Opyt izucheniya metodom VEZ geoelektricheskogo stroeniya doliny reki Leny «Tujmaada». *Vestnik evrazijskoj nauki*. 2021, vol. 13, no. 6. DOI: 10.15862/25ECVN621 [In Russian]
20. Shejnin V.I., Dzagov A.M. Ispol'zovanie lognormal'nogo raspredeleniya pri obrabotke rezul'tatov ispytaniy gruntov svayami. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2021, no. 3, pp. 2–5. [In Russian]

Информация об авторах / Information about the authors

Чуркин Алексей Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории новых видов свайных фундаментов ЦИСФ НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация
e-mail: chaa92@mail.ru

Aleksei A. Churkin, Cand. Sci. (Engineering), senior researcher of the laboratory of new types of pile foundations of the Pile Foundation Research Center of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction. Moscow, Russian Federation

Смирнов Игорь Дмитриевич, инженер лаборатории новых видов свайных фундаментов ЦИСФ НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство»; магистр кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Москва, Российская Федерация

e-mail: smirnov.ya-igor1999@yandex.ru

Igor D. Smirnov, engineer of the laboratory of new types of pile foundations of the Pile Foundation Research Center of NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow; master of the department of seismometry and geoacoustics, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University. Moscow, Russian Federation

УДК 699.841

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-48-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72)

Теоретические и экспериментальные исследования

Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта

Абаев Заурбек Камболатович¹, Валиев Азамат Джониевич², Кодзаев Марат Юрьевич³
^{1,2,3} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)». Владикавказ. Российская Федерация

Аннотация: В работе рассматривается текущее состояние политики снижения сейсмического риска в следующих странах: Япония, США, Китай, Италия и Российская Федерация. В частности, в работе сравниваются политики сейсмоусиления существующих зданий и механизмы финансирования комплексного снижения сейсмического риска в контексте нормативно-правового поля каждой страны. Проведенный анализ текущей политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации, позволяет сделать вывод о том, что она нуждается в серьезной модернизации и реорганизации, включая: 1) разработку нового поколения нормативных документов, регламентирующих методы расчета на сейсмические воздействия с учетом нелинейной работы материалов и повреждаемости сооружений и 2) разработку эффективных инструментов финансирования оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления существующего жилого фонда.

Цель работы заключается в выявлении передовых практик и механизмов реализации процесса сейсмоусиления, которые могут быть полезны для внедрения и реализации в рамках комплексной политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на федеральном и региональных уровнях.

Результатом работы являются рекомендации, разработанные на основе наиболее эффективных инструментов политики снижения сейсмического риска в рассмотренных странах, сгруппированные по ключевым этапам процесса сейсмоусиления:

- оценка риска существующих зданий;
- обмен знаниями;
- установка приоритетов сейсмоусиления;
- реализация политики сейсмоусиления;
- мониторинг эффективности реализации политики сейсмоусиления.

Ключевые слова: сейсмический риск, политика сейсмоусиления, сейсмостойкость, безопасность зданий, снижение риска

Для цитирования: Абаев З.К., Валиев А.Дж., Кодзаев М.Ю. Разработка рекомендаций по реализации политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на основе мирового опыта // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 48–72 DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-48-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72)

@ Z.K. Abaev, A.D. Valiev, M.Yu. Kodzaev, 2023

Theoretical and experimental studies

Development of recommendations for the implementation of seismic risk mitigation policy in the Russian Federation based on world experience

Zaurbek K. Abaev¹, Azamat D. Valiev², Marat Yu. Kodzaev³,

^{1,2,3} FSFEI HE North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University). Vladikavkaz, Russian Federation

Abstract: The current state of practice of seismic risk mitigation policy in the following countries is analyzed: Japan, USA, China, Italy and the Russian Federation. In particular, the paper compares seismic retrofit policies for existing buildings and financing mechanisms for comprehensive seismic risk mitigation in the context of each country's regulatory framework. The analysis of the current seismic risk mitigation policy in the Russian Federation leads to the conclusion that it needs serious modernization and reorganization, including: 1) development of a new generation of standards specifying nonlinear analysis methods and 2) development of effective financing mechanisms for the seismic evaluation and seismic modernization of the existing building stock.

The aim of this paper is to identify best practices in seismic retrofitting policy that may be useful for the implementation and adjustment of seismic risk mitigation policies in the Russian Federation at the federal and regional levels.

The result of the paper is a set of recommendations based on the most effective seismic risk mitigation policy instruments, grouped according to the key stages of the seismic amplification process:

- risk assessment of existing buildings;
- knowledge transfer;
- setting targets for the seismic modernization;
- implementation of the seismic strengthening policy;
- policy implementation monitoring.

Keywords: seismic risk, seismic retrofit policy, earthquake resilience, building safety, risk mitigation

For citation: Abaev Z.K., Valiev A.D., Kodzaev M.Yu. Development of recommendations for the implementation of seismic risk mitigation policy in the Russian Federation based on world experience. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 48–72. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-48-72](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-48-72)

Введение

Здания по всему миру подвержены повреждениям или обрушению в результате воздействия землетрясений, приводящих к человеческим жертвам и экономическим потерям [1]. Обрушение зданий является основной причиной смертей и травм во время землетрясений [2, 3]. В качестве ответной реакции на разрушительные землетрясения многие страны еще в начале 20 века начали разработку нормативных документов на проектирование зданий и сооружений в сейсмоопасных регионах [4]. Однако несмотря на постоянное развитие нормативной базы, на сегодняшний день многие здания по всему миру построены до внедрения актуальных норм и стандартов [5]. Более того, многие здания, поврежденные в результате предыдущих землетрясений, обладают дефицитом несущей способности и могут быть не в состоянии выдержать дополнительный ущерб, вызванный будущими землетрясениями [6]. Таким образом, во всем мире растет осознание

сейсмического риска и необходимости смягчения последствий для существующего жилого фонда [7].

В настоящем исследовании рассматриваются политики сейсмоусиления зданий и сооружений в наиболее сейсмоопасных странах. Цель работы заключается в выявлении передовых практик в области политики сейсмоусиления, которые могут быть полезны для внедрения и корректировки политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации на федеральном и региональных уровнях. В работе представлена подробная информация об особенностях политики снижения сейсмического риска и эволюции нормативных документов каждой рассмотренной страны.

Старые здания обычно строятся с использованием саманной, бутовой или кирпичной неармированной кладки, бетона с недостаточным количеством арматуры, деревянных каркасов. Зачастую в таких зданиях нарушены основные принципы сейсмостойкого строительства: некорректное распределение масс и жесткостей, гибкие этажи и т.п., что делает их крайне уязвимыми к разрушению при колебаниях грунта. Данные недостатки были исправлены путем разработки современных норм на строительство в сейсмоопасных регионах. Однако нехватка инженерно-технических кадров, отсутствие регулирующих механизмов для обеспечения полного соответствия нового строительства сейсмическим нормам и экономические ограничения все еще существуют во многих странах и регионах, что приводит к недостаточной сейсмостойкости вновь построенных зданий.

Сейсмоусиление обычно не может добиться повышения несущей способности (*capacity*) и деформативности (*ductility*) старых зданий до уровня нового строительства. Существующие стандарты обычно требуют, чтобы усиленные здания имели достаточную несущую способность, для возможности безопасной эвакуации людей, однако такие здания могут быть повреждены до уровня, не подлежащего восстановлению. Текущие нормы для большинства новых зданий нацелены на сохранение жизни находящихся в здании людей за счет сведения к минимуму вероятности глобального коллапса здания при значительном сотрясении (*максимальное землетрясение, контрольное землетрясение*). Особо ответственные здания, такие как больницы, могут соответствовать более высоким стандартам, поскольку должны оставаться в рабочем состоянии после умеренного землетрясения (*проектное землетрясение, расчетное землетрясение*).

В некоторых странах наивысший приоритет при сейсмоусилении отдается критически важным зданиям (например, больницам, центрам управления чрезвычайными ситуациями), инфраструктуре жизнеобеспечения и зданиям, в которых находится большое количество людей (например, школы), обрушение которых может привести к массовым человеческим жертвам. В настоящее время только в нескольких странах (например, в Соединенных Штатах и Новой Зеландии) есть законодательные акты, требующие обязательного сейсмоусиления частных жилых зданий, поскольку реализацию подобных требований относительно трудно обеспечить, и она, как правило, сопряжена с большими затратами. Большинство стран поощряют добровольное сейсмоусиление и часто предоставляют финансовую и техническую помощь собственникам зданий.

Сейсмоусиление – это крупная финансовая инвестиция, не приносящая немедленных дивидендов, и ее стоимость во многом зависит от потенциального дохода от эксплуатации здания в будущем [8]. Кроме того, из-за недостаточного информирования о рисках собственники зданий зачастую полагают, что сильное землетрясение не произойдет в течение их жизни [1] или что их здание не подвержено риску [4]. Надлежащая политика стимулирования может мотивировать собственников зданий проводить сейсмоусиление и, таким образом, снижать сейсмический риск в рассматриваемой области.

На сегодняшний день разработано множество методов и приемов сейсмоусиления. Выбор того или иного метода обусловлен, как правило, преследуемой целью усиления, наличием материально-технической базы, опыта реализации и экономической целесообразностью. В рассматриваемых странах применяемые методы можно

классифицировать по цели сейсмоусиления: 1) увеличение несущей способности – *strength retrofit* (увеличение площади существующих стен, установка внутренних или внешних стальных рам, устройство внешних поддерживающих сооружений и др.), 2) увеличение деформативности – *ductility retrofit* (устройство железобетонных или стальных обоев, обмотка углеродным волокном), 3) избежание концентрации повреждений – *avoidance of damage concentration* (улучшение вибрационных характеристик сооружения, улучшение работы хрупких элементов), 4) снижение сейсмических сил – *reduction of seismic force* (снижение веса, сейсмоизоляция, контроль вибрации сооружения), 5) усиление фундаментов – *foundation retrofit*. Подробное описание особенностей проектирования и технической реализации данных методов выходит за рамки настоящей работы.

Настоящее исследование состоит из двух частей:

- 1) анализ особенностей политики сейсмоусиления в рассматриваемых странах;
- 2) разработка рекомендаций на основе наиболее эффективных инструментов политики снижения сейсмического риска.

1. Анализ особенностей политики сейсмоусиления в рассматриваемых странах

1.1. Япония

В Японии действуют единые государственные стандарты строительства, применяемые как национальными, так и местными органами власти. Строительные нормы определяются Законом о строительных стандартах (*Building Standard Law, BSL*), который облегчает соблюдение нормативных требований и контроль, обеспечивая также минимальные стандарты безопасности [9], в отличие от США, где строительные нормы разрабатываются неправительственными техническими ассоциациями и должны быть имплементированы отдельными штатами [10].

В 1971 году Япония внесла поправки в Закон о строительных стандартах и усилила требования сейсмического проектирования железобетонных конструкций после землетрясения Токачи 1968 года (М 8,3). Вскоре после этого произошло землетрясение в провинции Мияги 1978 года (М 7,7) в северном регионе Японии, которое вызвало обрушение многих зданий, построенных в соответствии с Законом о строительных стандартах от 1971 года. В ответ на это Япония изменила стандарты проектирования, чтобы не только предотвратить обрушение зданий, но и обеспечить безопасность людей внутри зданий во время землетрясений, что позволило зданиям, построенным после 1981 года, выдерживать землетрясения на один уровень выше (М 6) по сравнению с предыдущими требованиями (М 5).

1.1.1. Политика снижения сейсмического риска

Политика сейсмоусиления в Японии нацелена на здания в зависимости от их функционального назначения. Катализатором современной политики сейсмоусиления стало Великое землетрясение Хансин-Авадзи (г. Кобе) 1995 года (М 6,9), которое произошло в южном регионе Японии и привело к гибели 6 437 человек и разрушению более чем 100 000 домов. Исследование, проведенное после землетрясения, показало, что 76 % обрушившихся зданий были построены до 1971 года, а 21 % – в период с 1971 по 1981 год. Это продемонстрировало, что одного обновления стандартов проектирования недостаточно для обеспечения безопасности людей и имущества. В результате Япония приняла ряд положений, в том числе «Закон о содействии сейсмоусилению зданий» (1995 г.) и «Закон о поддержке восстановления жилого фонда жертв стихийных бедствий» (1998 г.), призванные поддержать сейсмоусиление зданий, построенных до 1981 года [11].

Закон о сейсмоусилении 1995 г. предусматривал меры и рекомендации по выявлению и усилению зданий с дефицитом сейсмостойкости. Закон также содержал критерии

сейсмоусиления, разработанные национальным правительством, такие как увеличение доли сейсмостойких домов и специальных зданий (например, школ, больниц) до 75 % и 80 % к 2003 и 2008 годам соответственно. В 2005 году в Закон были внесены поправки, в соответствии с которыми в него были включены планы по сейсмоусилению зданий органов местного самоуправления. В полномочия органов местного самоуправления входят: 1) разработка общего плана и последовательности сейсмоусиления, 2) определение аварийных маршрутов и мест эвакуации на своих территориях. Кроме того, Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий (*МEXT*) разработало политику сейсмоусиления несущих и ненесущих элементов школьных зданий в Японии [11]. В 2013 году в Закон были внесены дополнительные поправки, требующие проведения оценки сейсмостойкости для крупных зданий, таких как больницы, гостиницы, школы и коммерческие объекты, требующие, чтобы результаты данной оценки были общедоступными.

Определение целесообразности усиления или сноса здания происходит на стадии диагностики – здание с сейсмостойкостью, эквивалентной или превышающей 60 % требований для нового строительства, не требует усиления.

На решение о сейсмоусилении также влияют:

- 1) потребность в сохранении усиливаемого здания,
 - 2) целевой уровень сейсмоусиления,
 - 3) доступность методов сейсмоусиления,
 - 4) затраты на сейсмоусиление / снос,
 - 5) уровень удовлетворенности обеспечением функциональных требований здания,
- а также –
- б) план будущего использования здания.

1.1.2. Механизмы финансирования снижения сейсмического риска

Япония внедрила систему финансового стимулирования для поощрения владельцев сейсмоусиляемых зданий. Для частных домов субсидия федерального правительства и местных органов власти покрывает 66,6 % стоимости оценки сейсмостойкости и 23 % стоимости сейсмоусиления, а остальные расходы оплачивают домовладельцы. Кроме того, для домов, усиленных до 2019 года, были предложены ограниченные по времени акции: центральные и местные органы власти предложили субсидию от 83,4 до 100 % на оценку сейсмостойкости и субсидию от 45,8 до 66,7 % на сейсмоусиление. В случае, если местные органы власти не предлагали никакого финансирования, на центральное правительство приходилось 33,3 % расходов на оценку и 11,5 % расходов на сейсмоусиление [10]. Наконец, местные органы власти получили доступ к субсидиям и дополнительному финансированию для оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления школ [11].

Правительство регулярно проводит мониторинг реализации политики снижения сейсмического риска для ее последующей корректировки, в том числе анализ жилого фонда и земли, анализ динамической статистики зданий, комплексное обследование условий жизни и обследование тенденций рынка жилья [10]. Например, Законы 1995 и 2005 гг. о содействии сейсмоусилению обязывают правительство увеличить долю сейсмостойких домов до 75 % к 2003 г., 80 % к 2008 г. и 90 % к 2015 г. Обследование 2008 г. выявило разрыв в 2 % между запланированной целевой ставкой и фактической ставкой, что побудило правительство предложить меры для устранения данного разрыва.

Помимо поощрения собственников зданий к соблюдению действующих строительных стандартов сейсмоусиления, Япония предоставляет дополнительные гранты при достижении уровня сейсмоусиления, превышающего обязательный стандарт. Государственная жилищная кредитная корпорация, которая предоставляет долгосрочные ссуды под низкие проценты для нового строительства, реконструкции и сейсмоусиления, установила собственные

технические критерии, выходящие за рамки обязательного минимального стандарта. Это позволяет зданиям достигать более высоких показателей сейсмостойкости, без дополнительной финансовой нагрузки на собственников, поскольку средства на повышение качества строительного процесса поступают со стороны частных банков, эффективно заполняя пробелы в финансировании для завершения строительства.

1.2. США

Более 80 % ежегодных потерь и разрушений от землетрясений в США приходится на наиболее сейсмоопасные штаты – на Калифорнию, Орегон и Вашингтон [12]. Последние крупные землетрясения в США произошли в Калифорнии, поскольку только через Южную Калифорнию проходит более сотни сейсмических разломов, а население Южной Калифорнии составляет более 20 миллионов человек, благодаря чему данный регион является более сейсмически уязвимым по сравнению с другими.

Одним из важнейших отличий США от других стран является то, что политика снижения сейсмических рисков в первую очередь является непосредственной обязанностью правительств штатов и местных органов власти, поскольку в стране нет федерального мандата (*federal mandate*) на принятие единых строительных норм и стандартов на территории всей страны.

Международный строительный стандарт (*International Building Code, IBC*) и Международные строительные нормы и правила (*International Existing Building Code, IEBС*) являются основой для большинства строительных норм и стандартов в США, но их адаптация на уровне отдельных штатов или на местном уровне приводит к существенным отличиям в требуемом уровне сейсмической безопасности на территории США. Однако активная работа Федерального агентства по чрезвычайным ситуациям (*Federal Emergency Management Agency, FEMA*) и реализация федеральной Национальной программы снижения опасности землетрясений (*National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP*), помогают обеспечить эффективное руководство и разработку рекомендаций для местных органов власти. В свою очередь, региональные инициативы также могут влиять на изменение федеральных нормативных документов.

1.2.1. Политика снижения сейсмического риска

Политика сейсмоусиления в отдельных штатах США базируется на учете специфических особенностей различных конструктивных схем зданий. Исключением является законопроект Сената Калифорнии (*California Senate Bill, SB*) 1953 г., поправка 1994 г. к Закону о сейсмической безопасности больничных учреждений (*Hospital Facilities Seismic Safety Act*) от 1983 г., требующий проведения сейсмоусиления больниц в Калифорнии. Данный законопроект относительно уникален, поскольку ориентируется на функциональное назначение здания и является непосредственной реакцией на разрушительное землетрясение в Нортридже в 1994 году [13]. Другой важной особенностью данного документа является установление целевых показателей для несущих и ненесущих элементов здания, необходимых для обеспечения функционирования больниц после землетрясения [14].

В нормативных документах США представлены методики оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления следующих конструктивных типов зданий:

- здания из неармированной кладки (*Unreinforced Masonry Buildings*);
- здания с гибкими этажами (*Soft-Story Buildings*);
- здания из хрупкого бетона (*Non-Ductile Concrete Buildings*);
- здания с металлическим каркасом (*Steel Moment-Frame Buildings*).

1.1.2. Механизмы финансирования снижения сейсмического риска

В Соединенных Штатах ответственность за сейсмоусиление несет собственник здания. Однако есть ряд программ, предоставляющих финансовую поддержку. К примеру, в 2013 г. Калифорния запустила пилотную программу под названием *Earthquake Brace and Bolt*, в рамках которой штат предоставляет домовладельцам гранты в размере 3 000 долларов в некоторых сейсмоопасных районах. На сегодняшний день программа охватывает более сотни районов. Усиливаются, как правило, деревянные каркасные дома. С 2017 года появился новый тип финансирования под названием *Property Assessed Clean Energy (PACE)*. Программа предоставляет 100 % финансирование, покрывающее расходы на получение разрешений, проведение изыскательских работ, проектирование и строительство для всех типов зданий. Период погашения займа составляет от 5 до 30 лет, процентная ставка от 6,5 до 8,5 % [15]. Кроме того, Калифорнийское управление по борьбе с землетрясениями предлагает скидку до 25 % на страховые взносы по страхованию от землетрясений для деревянных каркасных домов, которые были усилены в соответствии с Калифорнийскими строительными нормами.

Города Калифорнии реализуют собственные политики стимулирования сейсмоусиления в дополнение к программам штата. К примеру, город Альмеда предлагает освобождение от платы до 100 % за подготовку инженерного отчета и получение разрешения на строительство для зданий с гибкими этажами. Город Беркли предоставляет грант на сейсмоусиление, который покрывает до 75 % стоимости проектирования и 40 % стоимости строительства для зданий из хрупкого и сборного бетона и зданий с гибкими этажами с тремя или четырьмя секциями. Здания из неармированной кладки и здания с гибкими этажами с пятью и более секциями могут получить грант, покрывающий до 75 % и 30 % затрат на проектирование и строительство, соответственно. Город Сан-Франциско разрешает собственникам малоэтажных зданий передавать оплату 100 % общей стоимости сейсмоусиления жильцам в течение 20 лет, в то время как город Лос-Анджелес ограничивает эту сумму 50 % общей стоимости, передаваемой жильцам в течение 10 лет.

1.3. Китай

Строительные нормы в Китае, как и в Японии, определяются законом для обеспечения строгости соблюдения их положений. Первые сейсмические нормы вступили в силу в 1989 г. и с тех пор обновлялись каждые десять лет с незначительными поправками. В период с 1950-х по 1980-е годы было построено большое количество каменных и железобетонных зданий, спроектированных только на восприятие вертикальных нагрузок, без учета сейсмических воздействий. Сегодня эти старые здания не только не отвечают требованиям сейсмостойкости, но и непригодны из-за физического и морального износа [16].

Китай – одна из самых сейсмически активных стран мира, так как он расположен на нескольких активных тектонических плитах. Самое разрушительное землетрясение за последние десятилетия, Таншаньское землетрясение 1976 года (М 7,6), ударило по одному из самых густонаселенных регионов страны. Умерло более 242 000 человек, 85 % зданий рухнули или стали непригодными для использования в городе Таншань, и 10 % зданий рухнули в столице г. Пекине. В ответ Пекин учредил Совет по снижению риска землетрясений для ремонта поврежденных зданий и усилению уязвимых строений в своем районе [16]. Недавно Китай внес поправки в сейсмические нормы с целью обеспечить достаточную несущую способность школ и других социально значимых зданий, способных противостоять землетрясениям более высокой магнитуды, в связи с землетрясением в Вэньчуане в 2008 году (М 7,9).

1.3.1. Политика снижения сейсмического риска

Политика сейсмоусиления в Китае ориентирована на здания в зависимости от функционального назначения и потенциального риска землетрясения. В Китае за соблюдение строительных норм и правил отвечает Департамент строительства и развития, который выпускает Национальный план по снижению опасности землетрясений каждые пять лет. План на 2016 г. включал в себя задачи совершенствования системы регулирования, выявления зданий с высокой степенью риска, сейсмоусиления или нового строительства опасных общественных и жилых зданий, укрепления исторических зданий, использования информационных инструментов для поддержки управления сейсмическими рисками, а также содействия в разработке и внедрению методов повышения сейсмостойкости зданий [16].

1.3.2. Механизмы финансирования снижения сейсмического риска

В Китае расходы на сейсмоусиление, а также расходы на повышение энергоэффективности зданий и модернизацию несущих компонентов полностью финансируются местными органами власти. Здания усиливаются на основе государственных планов и бюджетов, что экономит время и деньги владельцев зданий при представлении планов усиления, а также подаче заявок на получение разрешений на строительство. Однако эта политика значительно увеличивает финансовую нагрузку на правительство, отчего она реализована лишь в ограниченном числе провинций. К концу 2017 года Пекин усилил более двух миллионов квадратных метров жилья [16].

В 2021 году центральное Правительство Китая разработало пятилетний план развития страны, частью которого является План развития национальной системы управления чрезвычайными ситуациями (*National Emergency Management System Plan*). Предыдущий план 2016 г., включавший в себя План по повышению сейсмической безопасности зданий по всей стране, позволял выделение финансирования и ресурсов на реализацию срочных проектов, таких как усиление наиболее уязвимых зданий, или помощь слаборазвитым районам, где местные органы власти не могли позволить себе крупномасштабное сейсмоусиление [16]. Кроме того, план позволял координировать работу различных ведомств, строительного сектора и собственников, что значительно повысило эффективность работ по сейсмоусилению. Однако, в тоже время, это увеличило нагрузку на местные органы власти и существенно снизило желание собственников играть активную роль в повышении сейсмической безопасности.

1.4. Италия

С 1905 по 2016 год в Италии произошло пятнадцать крупных землетрясений. Аквильское землетрясение 2009 года (М 6,3) унесло более 300 жизней, а в регионах Аквила и Абруццо было повреждено 10 000 зданий [6]. Последовательность землетрясений в Центральной Италии в 2016 году (между августом и октябрём 2016 года) привела к гибели 299 человек, 386 получили ранения, и почти 5000 человек остались без жилья в регионах Абруццо, Лацио, Марке и Умбрия [17].

Первые сейсмические нормы в Италии были утверждены в 1909 году после сильного землетрясения в Мессинском проливе. Данный документ несколько раз пересматривался, и редакцию 1974 года можно считать первой современной. После землетрясения в Ирпинии в 1980 г. (М 6,9) был принят новый метод сейсмической классификации, который был внесен в нормативный документ. На основе этого метода около 45 % территории страны относится к сейсмическим зонам 1, 2 и 3.

1.4.1. Политика снижения сейсмического риска

Италия имеет один из старейших в мире фонд зданий с большим количеством зданий из неармированной кладки (*URM*) и железобетонных (*RC*). Например, в северных городах Конкордия-делла-Секкья и Мирандола на здания из неармированной кладки приходится около 87 % и 70 % фонда зданий соответственно [18]. Очевидно, что данные сооружения не были спроектированы в соответствии с современными нормами и подвержены значительному риску сейсмических повреждений. К примеру, поскольку до 2009 года соблюдение положений о сейсмостойкости не было обязательным, старые здания из железобетона имеют серьезные конструктивные недостатки и нуждаются в усилении [6].

Первый нормативный документ, относящийся к существующим зданиям, был опубликован в 1986 году и существенно не менялся до 2003 года, когда был разработан и введен в действие новый свод правил, основанный на Еврокоде 8. Еврокод 8 представляет собой согласованные технические правила, которые применяются к проектированию и строительству зданий и инженерных сооружений в сейсмических районах. Он состоит из шести частей, касающихся различных типов сооружений, а *EN 1998-3* содержит технические стандарты для оценки сейсмостойкости и усиления существующих зданий. Данный документ определяет основные требования и критерии работоспособности конструкций в трех предельных состояниях (незначительные, умеренные и существенные повреждения). Он также содержит необходимую информацию о методах расчета зданий на сейсмические воздействия, а также критерии проверки безопасности железобетонных конструкций [19].

В редакции от 2008 г. был представлен метод «локального усиления» как для общественных, так и для частных зданий, позволяющий усиливать отдельные несущие элементы или части конструкции без изменения общего поведения сооружения. Кроме того, была принята новая карта сейсмической опасности, созданная с использованием метода микрорайонирования [6, 27]. Первоначально только ответственные общественные здания (например, больницы, школы) и объекты инфраструктуры (например, автомагистрали, железные дороги) должны были соответствовать сейсмическим нормам того времени. После землетрясения в Абруццо в 2009 г. (М 6,3) нормы сейсмостойкости были распространены на все типы сооружений.

Вскоре после вступления в силу норм 2003 года, Постановление № 3274 потребовало от местных органов власти в течение пяти лет завершить оценку сейсмостойкости для всех ответственных общественных зданий и объектов инфраструктуры в регионах со средней и высокой степенью опасности. Закон № 326, принятый в том же году, выделил фонд в размере 200 миллионов евро для поддержки оценки и сейсмоусиления зданий, признанных неудовлетворительными. К 2012 году количество проверенных зданий было намного меньше запланированных 35 000, поэтому правительство решило использовать список зданий, подлежащих проверке, для поддержки текущей Национальной программы по предупреждению сейсмической опасности [20]. Основная причина относительно медленного процесса оценки заключается в том, что для определения класса сейсмостойкости здания требуется проведение полевых изысканий, испытания материалов и численного моделирования [21].

1.4.2. Механизмы финансирования снижения сейсмического риска

После землетрясения в Абруццо в 2009 году, закон № 77 предоставил Департаменту гражданской защиты 1 миллиард евро на семилетнюю Национальную программу по предупреждению сейсмической опасности. В рамках программы финансировались исследования по сейсмическому микрорайонированию, усилению или реконструкции ответственных общественных зданий и объектов инфраструктуры, усилению или реконструкции частных зданий, в которых проживает большое количество людей. В рамках

программы также были разработаны инструменты и планы управления чрезвычайными ситуациями для городских сообществ [20]. К 2018 году в общей сложности было профинансировано 4 521 работ для общественных и частных зданий, из них 1 249 завершённых, общей стоимостью 665 миллионов евро.

В 2017 году Италия приняла программу «*Sisma-bonus*» («бонус за землетрясение»), политику налоговых стимулов призванную мотивировать владельцев зданий усиливать свои сооружения [18]. Данная инициатива позволяет возмещать налоги до 85 % стоимости сейсмоусиления несущих и ненесущих элементов, в зависимости от степени улучшения класса сейсмостойкости здания, с вычетом, равномерно распределенным от пяти до десяти лет [21]. Класс сейсмостойкости определяется либо с использованием 1) ожидаемого годового убытка (*expected annualized loss, EAL*), либо 2) индекса безопасности (*safety index, IS-V*). Метод *EAL* рассчитывает соотношение прямого экономического ущерба, связанного с ущербом вследствие землетрясения, и затрат на ремонт несущих и ненесущих элементов, к стоимости нового строительства. Метод *IS-V* вычисляет отношение между расчетными и требуемыми пиковыми ускорениями грунта для предельного состояния соответствующему безопасности жизнедеятельности. Пороговое значение, обычно используемое в процессах сейсмоусиления, составляет 60 % [28, 30].

Итальянское правительство предоставляет возмещение налогов владельцам зданий следующим образом: 1) 70 % для отдельных домов или производственных зданий при повышении класса риска на один уровень; 2) 80 % для отдельных домов или производственных зданий при повышении класса риска на два или более уровня; 3) 75 % для квартир при улучшении класса риска на один уровень; 4) 85 % для квартир при повышении класса риска на два или более уровня.

Сумма возмещения налога не может превышать 96 000 евро за каждую единицу недвижимости [22]. Несмотря на интерес общественности к снижению сейсмического риска было отмечено, что собственникам часто не хватает необходимой информации и инструментов для понимания преимуществ программы «*Sisma-bonus*» [18]. Наконец, Италия также призывает владельцев зданий повышать энергоэффективность наряду с сейсмоусилением [6]. Как и «*Sisma-bonus*», программа «*Ecobonus*» предполагает налоговое возмещение за повышение энергоэффективности до 65 % в течение десяти лет [23]. На сегодняшний день рассматривается потенциальная польза для общества от реализации комбинированной политики. Например, в работе [23] был представлен индекс глобальной производительности, учитывающий сейсмические, энергетические и экономические выгоды от комбинированной политики.

1.5 Российская Федерация

С начала прошлого века на территории России и Республик Советского Союза произошло несколько крупных землетрясений:

1. *Крымское землетрясение 12 сентября 1927 года.* Землетрясение магнитудой 6,7 балла. Погибло более трех тысяч человек. Было разрушено 70 % зданий города Ялты. Экономический ущерб оценивался в 25 миллионов рублей в ценах 1925 года.
2. *Ашхабадское землетрясение 6 октября 1948 года.* Землетрясение магнитудой 7,3 балла в столице Туркменской ССР Ашхабаде разрушило около 90 % строений города, а также унесло жизни 176 тысяч человек.
3. *Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года.* Землетрясение магнитудой 5,2 балла в Ташкенте разрушило 36 тысяч строений города, оставив без крова свыше 300 тысяч людей, а также унесло жизни 8 человек.
4. *Спитакское землетрясение 7 декабря 1988 года.* Землетрясение интенсивностью до 10 баллов и магнитудой 7 унесло жизни 25 тысяч человек, полностью разрушив город

Спитак и 58 сел, а также частично разрушив более 300 населенных пунктов, оставив без крова 514 тысяч людей.

5. *Нефтегорское землетрясение 27 мая 1995 года.* Землетрясение магнитудой 7,6 балла на Сахалине уничтожило поселок Нефтегорск в 30 км от эпицентра, унесло жизни 2 040 человек при общем населении поселка 3197 человек. Ущерб оценивали в 400 миллиардов рублей в ценах 1995 года.

Первые нормативные документы на строительство в сейсмических регионах в Советском Союзе появились еще в 40-х годах прошлого столетия в виде инструкций и технических условий, начиная с конца 50-х годов была введена система строительных норм (СН), в дальнейшем переименованная в строительные нормы и правила (СНиП). На сегодняшний день актуальным нормативным документом является свод правил (СП) СП 14 13330 2018 Строительство в сейсмических районах. Следует также отметить, что в 2020 году вышло Изменение 1 данного СП, которое вызвало противоречивую реакцию научного и инженерного сообществ, в результате чего Приказом Минстроя России от 29 января 2021 года №27/пр данное изменение было отменено.

Следует отметить значительный вклад отечественных ученых в развитие современной теории сейсмостойкого строительства, в частности, существенные результаты приведены в трудах таких специалистов как (список далеко не полный): Абакаров А.Д., Айзенберг Я.М., Амбарцумян В.А., Амосов А.А., Болотин В.В., Гольденблат И.И., Джинчвелашвили Г.А., Завриев К.С., Коренев Б.Г., Корчинский И.Л., Лужин О.В., Масленников А.М., Мкртычев О.В., Назаров А.Г., Назаров Ю.П., Немчинов Ю.И., Николаенко Н.А., Овечкин А.М., Перельмутер А.В., Петров В.В., Поляков С.В., Ржевский В.А., Саргсян А.Е., Сеницын Ю.Э., Смирнов А.Ф., Смирнов В.И., Сорокин Е.С., Тяпин А.Г., Уздин А.М., Черепинский Ю.Д. и др.

Методика оценки экономической эффективности сейсмостойкого строительства на основе теории риска была разработана лауреатом нобелевской премии, академиком Канторовичем Л.В. и его учениками. При этом ими введено понятие «сейсмический риск» R , который рассматривался, как математическое ожидание ущерба D [24].

Большой вклад в разработку отечественной нормативно-технической документации внес Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В. А. Кучеренко, на сегодняшний день являющийся одним из структурных подразделений АО «НИЦ «Строительство».

В новейшей истории России проблема снижения сейсмического риска решалась путем реализации целевых программ. В таблице 1 представлен список целевых программ различного уровня (федерального, регионального и муниципального), а также общий объем средств, направленных на их реализацию.

Представленные данные свидетельствуют об актуальности и важности решения вопросов снижения сейсмического риска в Российской Федерации, однако несмотря на внушительный объем финансирования и продолжительную историю реализации программ, эффективная методология оценки сейсмостойкости и последующего сейсмоусиления существующего жилого фонда, также как и специальные механизмы финансирования данного процесса, до сих пор не предложены, хотя необходимость их разработки неоднократно подчеркивалась в целях и задачах указанных программ.

Таблица 1– Целевые программы снижения сейсмического риска в РФ

Table 1– Seismic risk mitigation federal programs at the Russian Federation

Федеральный уровень			
<i>№</i>	<i>Наименование</i>	<i>Период реализации</i>	<i>Общий объем средств, млрд руб.</i>
1.1	Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации. Сейсмика.	2019–н.в.	28004
1.2	Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009 – 2018 годы	2009–2018	49390
1.3	Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года	2011–2015	8614
1.4	Сейсмобезопасность территории России	2002–2010	28783,9
1.5	Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года	2006–2010	1264,163
1.6	Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2005 года	1997–2005	3046
1.7	Развитие федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений на 1995 – 2000 годы	1995–2000	19339
Региональный уровень			
2.1	Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в Камчатском крае. Государственная программа Камчатского края	2014–2018	4,223
2.2	Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Амурской области на 2011 – 2014 годы	2011–2014	79,857
2.3	Сейсмобезопасность территории Республики Ингушетия на 2007–2010 годы	2007–2010	1,066
Муниципальный уровень			
3.1	Обеспечение доступным жильем и развитие дорожной сети в г. Улан-Удэ	2019–2025	12,3
3.2	Обеспечение жильем населения городского округа «город Якутск»	2018–2022	2,818
3.3	Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Кемеровской области на территории Беловского городского округа	2017–2019	0,251
3.4	Обеспечение населения МО «Южно-Курильский городской округ» качественным жильем	2014–2020	0,35
3.5	Проведение мероприятий по сейсмоусилению жилых домов микрорайона Верхние Черемушки г. Красноярска	2011–2013	0,042
3.6	Проведение работ по сейсмоусилению жилых домов в Петропавловск-Камчатском городском округе	2009–2013	0,611

На рисунке 1 представлено распределение общего объема финансирования программ федерального уровня.

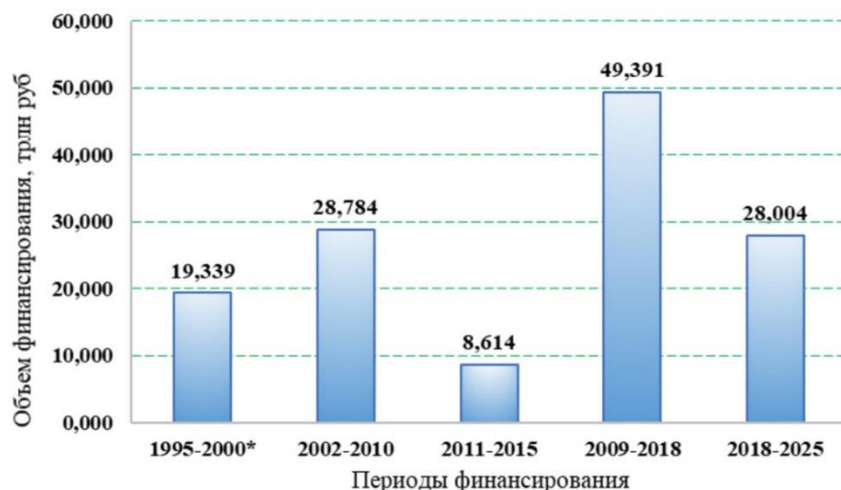


Рисунок 1 – Объем финансирования федеральных целевых программ

Figure 1 – Funding for federal target programs

Очевидно, что важнейшим элементом политики сейсмоусиления является развитая нормативно-техническая база, регламентирующая различные стадии процесса. Существующие нормативные документы должны быть взаимоувязаны друг с другом, лишены двусмысленностей и противоречий [25] и полностью удовлетворять нормативным запросам, начиная с момента проведения оценки сейсмостойкости и заканчивая мониторингом эффективности реализации политики сейсмоусиления.

На сегодняшний день в РФ можно выделить лишь два нормативных документа в явном виде регламентирующих задачи оценки сейсмостойкости и обследования последствий землетрясений:

- СП 442.1325800.2019 Здания и сооружения. Оценка класса сейсмостойкости (далее – СП 442);
- СП 322.1325800.2017 Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила обследования последствий землетрясения (далее – СП 322).

На рисунках 2–3 представлена взаимосвязь данных сводов правил с другими нормативными документами в области строительства.



Рисунок 2 – Взаимосвязь СП 442.1325800.2019 с другими нормативными документами

Figure 2 – SP 442.1325800.2019 relationship with other normative documents



Рисунок 3 – Взаимосвязь СП 322.1325800.2017 с другими нормативными документами

Figure 3 – SP 322.1325800.2017 relationship with other normative documents

Подробный анализ указанных документов вызывает ряд вопросов по части их практической реализации.

К примеру, в пункте 4.6. СП 422 говорится об обязанности собственника выполнять мероприятия по оценке класса сейсмостойкости, однако в настоящий момент в РФ нормативно-правовая база, регулирующая данное обязательство и отношения между участниками процесса, недостаточно разработана и зачастую противоречива.

Приложение «А» СП 422, а также п. 7.8 СП 322 требуют проведение расчетов с учетом физических несовершенств, повреждаемости сооружений и нелинейной работы строительных материалов, ссылаясь, в свою очередь, на СП 14.13330.2018 который регламентирует два метода расчета: 1) линейно-спектральный метод расчета и 2) расчет во временной области с использованием акселерограмм, однако не предоставляет дальнейших рекомендаций и критериев для учета отмеченных дефектов. Очевидно, что выбор расчетной схемы и методика учета дефектов целиком определяется инженером и его предпочтениями. Для устранения данного обстоятельства необходимо наличие строгой методологии с подробными критериями и параметрами для различных типов сооружений, которая позволит избежать потенциальных ошибок и разночтений, а также создать возможность для эффективной экспертизы и контроля проектов.

В качестве примера успешной реализации подобной методологии можно отметить стандарт США *ASCE 41-17*, который определяет процедуры и критерии оценки сейсмостойкости существующих зданий, мостов, туннелей и других инфраструктурных объектов. Данный стандарт выделяет три уровня оценки, называемых *Tier 1*, *Tier 2* и *Tier 3*, каждый из которых представляет собой последовательно более детальный и точный уровень оценки сейсмостойкости сооружений. *Tier 1* представляет собой быструю предварительную оценку, на которой основываются дальнейшие исследования и более подробная оценка на уровне *Tier 2*. *Tier 3* – наиболее подробная и точная оценка, проводимая в случае необходимости комплексных исследований и детального анализа. Данная методология позволяет проводить эффективную оценку сейсмостойкости зданий и сооружений и определять необходимые меры по их усилению в зависимости от уровня риска и заданного уровня безопасности.

Пункт 5 СП 322 регламентирует использование общегородской системы мониторинга, однако на сегодняшний день, успешные прецеденты реализации подобной системы в РФ, а

также методики ее практической имплементации и внедрения в существующую систему управления населенными пунктами освещены недостаточно подробно и носят единичный характер [26]. Пункт 9 данного документа посвящен корректировке прогностических карт последствий землетрясений, однако также не регламентирует методику расчета, необходимые критерии и параметры для построения данных карт.

Наиболее известным примером решения похожей задачи является программное обеспечение *Hazus FEMA* [57, 58], разработанное в США для моделирования и анализа последствий природных катастроф, таких как землетрясения, ураганы, наводнения и т.д. Оно используется для оценки уязвимости и рисков объектов инфраструктуры, включая здания, дороги, мосты, водопроводы и электростанции, и определения потенциальных последствий катастроф на экономику и население. *Hazus FEMA* основано на методологии, которая включает в себя сбор и анализ данных о физических, экономических и социальных характеристиках региона. Эти данные используются для создания моделей и сценариев катастроф, которые могут помочь определить наиболее уязвимые области и объекты инфраструктуры, а также оценить потенциальные экономические и социальные последствия.

В таблице 2 представлены нормативные требования, налагаемые рассматриваемыми сводами правил и необходимые атрибуты их реализации. Выявленные противоречия и несовершенства данных документов как нельзя лучше подтверждают отмеченную ранее необходимость разработки строгой и последовательной нормативной документации, обеспечивающую надежное основания для реализации политики сейсмоусиления в Российской Федерации.

Резюмируя анализ текущей политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации, можно сделать вывод о необходимости серьезной модернизации и реорганизации основных принципов ее реализации, включая: 1) разработку нового поколения нормативных документов, регламентирующих методы расчета на сейсмические воздействия с учетом нелинейной работы материалов и 2) разработку эффективных инструментов финансирования оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления существующего жилого фонда.

Ниже предложен ряд практических рекомендаций, основанных на наиболее эффективных мировых практиках.

2. Разработка рекомендаций на основе наиболее эффективных инструментов политики снижения сейсмического риска

Основной вывод, который можно сделать из проведенного анализа, заключается в том, что любые изменения политики снижения сейсмического риска исторически обусловлены последствиями крупных землетрясений. Страны, рассматриваемые в данном исследовании, недавно столкнулись или продолжают переживать последствия разрушительных землетрясений, в то время как на территории бывшего Советского Союза последнее разрушительное землетрясение произошло в 1988 в городах Спитак и Ленинакан.

Очевидно, что федеральным, региональным и муниципальным органам власти не следует ждать очередной катастрофы, чтобы снизить риск сейсмических воздействий. Инженерные и практические знания, необходимые для эффективных мер по сейсмоусилению, доступны и могут предотвратить множество смертей и травм в неизбежных будущих землетрясениях. На примере Японии стала очевидной необходимость тщательного мониторинга и регулярного обновления политики снижения сейсмического риска: Япония не только вносит изменения в строительные нормы после каждого крупного землетрясения, но и проводит периодические обследования существующего жилого фонда. Правительство также корректирует политику стимулирования сейсмоусиления, чтобы устранить критический разрыв между запланированными и фактическими темпами выполнения работ [10].

Отечественная нормативно-правовая база и процесс разработки и принятия новых стандартов сильно отличается от процедур в других странах. Тем не менее, их опыт может оказаться полезными для федерального и региональных правительств, реализующих политику повышения сейсмостойкости. Ниже представлены рекомендации (см. рис. 4), разработанные на основе сравнительного анализа политик снижения сейсмического риска, рекомендации сгруппированы по ключевым этапам процесса сейсмоусиления. Важно отметить, что данный процесс не следует рассматривать как единоразовый и линейный, а вместо этого он должен быть частью повторяющегося цикла от оценки рисков до мониторинга для дальнейшего повышения сейсмостойкости зданий [29].

Таблица 2– Нормативные требования СП 442.1325800.2019 и СП 322.1325800.2017

Table 2– Regulatory demands of SP 442.1325800.2019 и SP 322.1325800.2017

СП 322.13225800.2017	
<i>Нормативное требование</i>	<i>Необходимый/отсутствующий атрибут реализации</i>
п. 5 Общегородская система мониторинга	– Пример реализации – Структура и требуемые элементы – Методика внедрения в существующую систему управления
п. 5.3.2 Прогностические карты последствий землетрясений	– Методика построения – Критерии оценки
п. 7.2 Выявление общих для широкого класса зданий тенденций	– Единая классификация – Критерии оценки – Методология оценки
п. 7.8 Учет нелинейной работы материалов, дефектов, неоднородностей	– Критерии моделирования и оценки – Методы расчета
п. 8.5 Экономические потери от землетрясений	– Методика определения экономического ущерба
п. 9 Прогностические карты последствий землетрясений	– Примеры реализации – Методика построения
СП 442.1325800.2019	
<i>Нормативное требование</i>	<i>Необходимый атрибут реализации</i>
п. 4.6 Обязанность собственника выполнять мероприятия	– Нормативно-правовая база
п. 8.3 Меры по повышению класса сейсмостойкости	– Нормативно-правовая база – Методология количественной оценки
п. 9 Конструктивная уязвимость	– Количественные показатели – Методика определения
Приложение А. Поверочные расчеты	– Критерии оценки – Методология определения показателей

2.1. Оценка риска существующих зданий

Первым шагом в разработке политики сейсмоусиления является выявление проблемы.

Можно выделить следующие передовые методы оценки риска:

– *Поддержка оценки сейсмостойкости:* к примеру, японский закон о содействии сейсмоусилению сейсмостойких зданий предоставляет щедрые субсидии собственникам зданий на проведение мероприятий по оценке сейсмостойкости, которая является менее дорогостоящей и, следовательно, местным органам власти легче частично или полностью ее финансировать, чем обеспечить само сейсмоусиление [6, 12]. Кроме того, Турция ввела в свои нормы новые методы оценки, позволяющие быстро проверять и оценивать существующие здания [6, 30]. Это подчеркивает необходимость постоянного

совершенствования руководящих принципов и стандартов оценки сейсмостойкости для повышения точности и снижения стоимости методов оценки. Как было отмечено ранее, последнее является особенно важным в контексте реализации в Российской Федерации.

– *Информация о потенциальном риске*: сведения о потенциальном риске, создаваемом зданиями, должны быть доступными для населения, например, как в Японии и в некоторых городах штата Калифорния.

– *Повышение осведомленности общества*: крайне важно объяснить не техническим специалистам риски, связанные с сейсмическими явлениями, ясным и простым образом. К примеру, в Италии класс сейсмостойкости используется для описания уровня риска здания [21], а закон Новой Зеландии о строительстве использует процент от требований норм для нового строительства (*% new building standard, NBS*) для обозначения сейсмического риска [1].

2.2. Обмен знаниями

Федеральные и региональные органы власти могут воспользоваться техническими знаниями и поддержкой экспертов в области оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления. Кроме того, обмен информацией на региональном, национальном и международном уровнях является важным механизмом, с помощью которого развивается данная область знаний.

– *Инструменты принятия решений*: например, Индия, Япония [10] и Новая Зеландия [1] разработали инструменты для принятия решений по сейсмоусилению, включающие в себя технико-экономическую оценку. Разработка нормативного документа для принятия решений по сейсмоусилению, позволяющему провести экономическую оценку различных вариантов сейсмоусиления, поможет исполнительной власти определить наиболее оптимальный план сейсмоусиления, а собственникам зданий – более эффективно отреагировать на него.

– *Расширение партнерства государственного и частного секторов*: партнерство с частным сектором (проектно-изыскательные организации, строительные компании) и академическими сообществами может быть бесценным для расширения базы знаний конкретного региона, просвещения общественности и повышения уровня технической подготовки. В Турции процедуры сейсмической оценки в рамках закона о городском преобразовании были разработаны совместно сотрудниками министерства и учеными в этой области [30]. Такие партнерства также были важной частью политики сейсмоусиления в Иране [31]. В США город Сизтл в партнерстве с некоммерческой организацией разработал стратегии финансирования для своей программы сейсмоусиления. Кроме того, большинство комитетов по нормативным документам в США включают экспертов как из научных кругов, так и из практикующих инженеров.

– *Использование местного опыта*: никто не понимает риск для конкретного региона лучше, чем само общество данного региона. К примеру, в Италии Департамент гражданской защиты информирует население о сейсмическом риске, риске наводнений и оползней в рамках дней информирования населения под названием «Я не рискую» [32]. Кроме того, знания одних регионов могут быть полезны другим, сталкивающимся с аналогичными рисками, особенно тем, у которых нет ресурсов для самостоятельной разработки политики снижения сейсмического риска. В США мандат Сан-Франциско на сейсмоусиление зданий с гибкими этажами повлиял на принятие аналогичного мандата в других городах Калифорнии. Более того, локальные знания могут повлиять на общую политику. Например, стандарты сейсмоусиления зданий с гибкими этажами в г. Фремонт легли в основу нормативного документа *IEBC* 2003 г. Можно также отметить опыт международной консультативной деятельности на примере Румынии, которая обратилась к Японии за технической помощью в своей программе сейсмоусиления [33].

2.3. Установка приоритетов сейсмоусиления

Традиционно, наиболее уязвимые здания определяются исходя из конструктивного типа и материалов, например, здания из неармированной кладки считаются одними из наиболее уязвимых [34]. Помимо решения проблем наиболее уязвимых зданий, политика сейсмоусиления может быть направлена на особо ответственные, «критические» здания, разрушение которых может представлять значительный риск для общественной безопасности.

– *Разработка национальной системы классификации конструктивных типов зданий*: к примеру, в базе данных FEMA Hazus рассмотрено 16 конструктивных типов зданий, нормы ASCE 41-17 описывают процедуру сейсмоусиления для 8 конструктивных типов зданий, а нормы ASCE 7 предоставляют возможность для проектирования более 80 систем восприятия сейсмической нагрузки.

– *Определение приоритетов использования зданий*: в дополнение к классификации сейсмической уязвимости по конструктивному типу, важна также и классификация по функциональному назначению. Например, Национальный план Китая по снижению опасности землетрясений, иранская инициатива «*Doable Initiative*» и японский закон о содействии сейсмоусилению направлены на критически важные здания, такие как больницы и школы, и предусматривают обязательное сейсмоусиление.

– *Приоритет административных и общественных зданий*: крайне важным является сейсмоусиление административных и общественных зданий (например, индийское национальное руководство по борьбе со стихийными бедствиями по сейсмическому переоснащению аварийных зданий и сооружений и стамбульский проект по снижению сейсмических рисков и обеспечению готовности к чрезвычайным ситуациям в Турции). В США президентский указ [35] рекомендует усиливать правительственные здания, а в Сан-Франциско уже усилено более 100 общественных зданий.

2.4. Реализация политики сейсмоусиления

Возможно, самым сложным этапом процесса сейсмоусиления является его непосредственная реализация. Даже при наличии строгой нормативной базы, ее соблюдение не всегда обеспечивается. Тем не менее, наличие финансовой поддержки со стороны государства может улучшить данную статистику. Еще одно решение, это совместить сейсмоусиления с другими типами реновации и реконструкции, за которые собственник здания готов платить. К примеру, в США здания, которые получают повреждения при землетрясении, а также вновь возводимые здания являются объектами обязательного сейсмоусиления.

– *Финансовая поддержка*: некоторые страны предлагают финансовую поддержку для добровольного сейсмоусиления жилых зданий, например, система субсидий в Японии [10] и налоговое возмещение «*Sisma-bonus*» в Италии [21], или государственные фонды для обязательного сейсмоусиления, как в Китае [16]. Финансовая поддержка и стимулы могут помочь собственникам зданий в реализации политики. Например, Япония предоставила субсидии собственникам зданий на оценку сейсмостойкости и сейсмоусиление, что позволило обеспечить соответствие запланированным показателям на каждом этапе [10].

– *Унифицированные процедуры сейсмоусиления*. Отчасти причина того, что сейсмоусиление является такой дорогостоящей задачей, заключается в том, что оно уникально для каждого здания. В Китае здания усиливаются на основе государственных планов и бюджетов, которые экономят время и деньги собственников зданий при разработке проектной документации на сейсмоусиление и подаче заявок для получения разрешения на строительство [16]. Аналогичные усилия по стандартизации проектной документации также могут быть применены в России.

– *Провоцирующие факторы*: сейсмоусиление может быть более эффективно в сочетании с другим уже осуществляемым видом деятельности. Например, предусматривает, что конструктивные изменения здания, такие как расширение существующих или добавление новых комнат, являются провоцирующим фактором сейсмоусиления. Точно так же в США изменения функционального назначения здания могут инициировать процесс сейсмоусиления [36]. Один из способов упростить данный процесс – требовать проведения оценки сейсмостойкости при подаче заявки на получение разрешения на реконструкцию и реновацию в составе проектной документации. Закон Новой Зеландии о строительстве 2016 г. поручил территориальным властям определить процедуры, с помощью которых необходимо применять стандарты и требования сейсмоусиления. Увязка с действующими процедурами поможет более эффективно использовать уже вложенные инвестиции, вместо дополнительных специализированных усилий на реализацию политики сейсмоусиления.

– *Интеграция с другими целями*: в Китае [16] и Италии [23] сейсмоусиление проводится в сочетании с энергоэффективной модернизацией. Финансирование по программе *Property Assessed Clean Energy (PACE)* в США было распространено на сейсмоусиление коммерческой недвижимости в Калифорнии, Орегоне и Юте [37] в попытке стимулировать сейсмическую безопасность в сочетании с устойчивым развитием.

2.5. Мониторинг эффективности реализации политики сейсмоусиления

После разработки политики сейсмоусиления важно убедиться, что она оказывает желаемый эффект, достигает поставленных целей и может ответить на следующие вопросы:

- 1) снизился ли сейсмический риск?
- 2) можем ли мы обоснованно предположить, что количество смертей, травм или экономического ущерба уменьшилось?

Анализ опыта других стран, показывает, что постоянный мониторинг эффективности реализации политики сейсмоусиления является ее необходимым атрибутом.

– *Мониторинг и оценка эффективности*: регулярный мониторинг и оценка эффективности реализации политики сейсмоусиления необходимы для увеличения ее объемов и качественной модернизации в будущем. Помимо сбора информации в момент подачи заявлений на получение разрешения на строительство или завершения работ по сейсмоусилению, существуют и другие методы сбора соответствующей информации. Например, в Японии регулярно проводятся обследования для сбора информации о сооружениях, оценки воздействий и недостатков и соответствующего обновления политики [10]. Обеспечение надлежащего функционирования жилого фонда имеет неопределимое значение. Турция ввела меры по контролю качества строительства с оценкой, которая отвечает на вопрос: «Действительно ли здания соответствуют тому уровню, который заявлен их проектами?» [30].

– *Целостный подход*: следует иметь в виду, что обрушение здания может иметь значительные последствия не только для лиц, проживающих в нем, но и для тех, кто находится рядом, в дополнение к другим кумулятивным последствиям разрушений в районе и населенном пункте в целом. Любая инициатива, стремящаяся снизить риск, должна учитывать какие географические или демографические районы города или региона должны быть усилены в первую очередь, исходя из потенциального ущерба от возможного землетрясения. Японский закон 2005 г. о содействии сейсмоусилению определяет аварийные маршруты и механизмы эвакуации, характерные для различных уровней сейсмической опасности; на всем протяжении этих маршрутов должно быть обеспечено эффективное сейсмоусиление всех потенциально опасных объектов и реализована необходимая инфраструктура. В Турции наиболее небезопасные здания подлежат сносу, а правительство оказывает помощь в аренде жилья переселяемым жителям [30]. США добились больших успехов в моделировании сценариев, помогающих визуализировать воздействие на

строительные объекты рассматриваемого региона и подготовить основу для более эффективного планирования снижения рисков [38].

– *Обеспечение гарантий восстановления*: необходимо учитывать, что получение результатов реализации политики сейсмоусиления требует значительного времени, а также то, что усиление некоторых зданий будет нецелесообразно. Поэтому разработка эффективной политики сейсмоусиления должна быть подкреплена эффективными механизмами страхования от землетрясения. Механизм страхования может частично или полностью покрывать ремонт и восстановление поврежденных сооружений, что поможет снизить общий негативный эффект для региона и общества в целом. К примеру, в Турции действует обязательное страхование от землетрясений для жилых домов – Турецкий фонд страхования от катастроф (*TCIP*). Хотя такого рода жесткие требования могут и не подходить для всех районов Российской Федерации, они могли бы применяться в регионах с повышенным сейсмическим риском.

Заключение

В странах, где реализуется активная политика сейсмоусиления, таких как Япония, Италия и Новая Зеландия, количество обрушений и серьезно поврежденных зданий во время недавних землетрясений значительно меньше, чем можно было бы ожидать. Это позволяет сделать вывод о том, что улучшение качества сейсмического проектирования, включая сейсмоусиление, может оказать значительное влияние на работоспособность зданий во время землетрясения. Проведенный анализ позволяет предложить несколько рекомендаций для эффективной реализации политики снижения сейсмического риска. Предложенные рекомендации учитывают нелинейный и сложный механизм планирования снижения рисков и ключевые этапы процесса сейсмоусиления.

Во всех странах, рассматриваемых в настоящем исследовании, политика сейсмоусиления в основном направлена на наиболее уязвимые здания: каменную и саманную кладку, старые бетонные и деревянные каркасные здания и т.п. Помимо решения проблемы наиболее уязвимых зданий, политика так же, как правило, фокусируется на особо ответственных («критических») зданиях, разрушение которых представляет значительный риск для общественной безопасности. Определение приоритетности зданий существенно отличается в каждой стране, кроме выраженного консенсуса по поводу школ и больниц. Некоторые страны, например Япония, считают критическими здания, в которых одновременно находится большое количество людей, например, высотные офисные здания, универмаги и гостиницы, в то время как другие (Иран) могут рассматривать как критически важные объекты инфраструктуры, например, ядерные объекты. Важным направлением для будущих исследований является изучение и определение параметров для спектра мероприятий по сейсмоусилению, от минимальных требований (для зданий, представляющих наибольший риск) до максимального приложения (выход за пределы которого нецелесообразен).

Резюмируя анализ текущей политики снижения сейсмического риска в Российской Федерации, можно сделать вывод о необходимости серьезной модернизации и реорганизации основных принципов ее реализации, включая: 1) разработку нового поколения нормативных документов, регламентирующих методы расчета на сейсмические воздействия с учетом нелинейной работы материалов и повреждаемости сооружений и 2) разработку эффективных инструментов финансирования оценки сейсмостойкости и сейсмоусиления существующего жилого фонда.

Одним из важнейших вопросов политики снижения сейсмического риска является обеспечение соблюдения требований реализуемых механизмов, особенно в рамках добровольной политики сейсмоусиления, поскольку даже при обязательной политике не всегда возможно добиться полного соблюдения нормативных требований. Другой

проблемой является недостаточные знания о технико-экономической стороне сейсмоусиления. Стоимость сейсмоусиления существенно варьируется в разных странах, поэтому разработка соответствующей методологической базы является крайне важной задачей.

Список литературы

1. Egbelakin T., Wilkinson S., Ingham J. Economic impediments to successful seismic retrofitting decisions. *Structural Survey*. 2014, vol. 32, no. 5, pp. 449–466.
2. Coburn A.W., Spence R.J.S., Pomonis A. Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse. *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*. 1992.
3. Kenny C. Why do people die in earthquakes? The Costs, Benefits And Institutions Of Disaster Risk Reduction In Developing Countries. 2009. 114 p. doi: 10.1596/1813-9450-4823.
4. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
5. Jaiswal K.S. et al. Estimating annualized earthquake losses for the conterminous United States. *Earthquake Spectra*. 2015, vol. 31, pp. 221–243. doi: 10.1193/010915EQS005M.
6. Georgescu E. S. et al. Seismic and energy renovation: A review of the code requirements and solutions in Italy and Romania. *Sustainability (Switzerland)*. 2018, vol. 10, no. 5, pp. 1561–1597. doi: 10.3390/su10051561.
7. Filippova O., Noy I. Earthquake-strengthening policy for commercial buildings in small-town New Zealand. *Disasters*. 2020, vol. 44, no. 1, pp. 179–204. doi: 10.1111/disa.12360.
8. Markhvida M., Baker J.W. Unification of seismic performance estimation and real estate investment analysis to model post-earthquake building repair decisions. *Earthquake Spectra*. 2018, vol. 34, no 4, pp. 1547–1555. doi: 10.1193/030118EQS048M.
9. Tomohiro H. The building center of Japan. Japan. 2013. 237 p.
10. World Bank. Converting disaster experience into a safer built environment: The case of Japan. 2018.
11. Ando S. Evaluation of the Policies for Seismic Retrofit of Buildings. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2012, vol. 6, no. 4, pp. 391–402. doi: 10.17265/1934-7359/2012.04.001.
12. Jaiswal K., Wald D.J. Creating a global building inventory for earthquake loss assessment and risk management. US Geological Survey open-file report-1160. 2008. 110 p.
13. Lee Preston B. et al. Updating the Costs of Compliance for California’s Hospital Seismic Safety Standards. 2019. 125 p.
14. Jacques C. C. et al. Resilience of the canterbury hospital system to the 2011 Christchurch earthquake. *Earthquake Spectra*. 2014, vol. 30, no 1, pp. 533–554. doi: 10.1193/032013EQS074M.
15. Hui T. The cost of compliance. San Francisco Apartment Association. 2017.
16. Pan P., Shan M. Seismic reinforcement policies for urban communities. *City and Disaster Reduction*. 2019, vol. 5, pp. 71–76.
17. Fiorentino G. et al. Damage patterns in the town of Amatrice after August 24th 2016 Central Italy earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 1399–1423. doi: 10.1007/s10518-017-0254-z.
18. Basaglia A. et al. Assessing community resilience, housing recovery and impact of mitigation strategies at the urban scale: a case study after the 2012 Northern Italy Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020, vol. 18, no. 13, pp. 6039–6074. doi: 10.1007/s10518-020-00919-8.
19. Pinto P. E., Franchin P. Eurocode 8: Assessment and retrofitting of buildings. 2011.
20. Dolce M. The Italian national seismic prevention program. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal. 2012. 24 p.

21. Cosenza E. et al. The Italian guidelines for seismic risk classification of constructions: technical principles and validation. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018, vol. 16, no. 12, pp. 5905–5935. doi: 10.1007/s10518-018-0431-8.
22. Caterino N., Cosenza E. A multi-criteria approach for selecting the seismic retrofit intervention for an existing structure accounting for expected losses and tax incentives in Italy. *Eng Struct*. 2018, vol. 174, pp. 1085–1100. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.090.
23. Formisano A., Vaiano G., Fabbrocino F. A seismic-energetic-economic combined procedure for retrofitting residential buildings: A case study in the Province of Avellino (Italy). *AIP Conference Proceedings*. 2019. doi: 10.1063/1.5114435.
24. Канторович Л.В., Кейлис-Борок В.И., Молчан Г.И. Сейсмический риск и принципы сейсмического районирования // *Вычислительная сейсмология*. 1974. № 6. С. 3–20.
25. Абаев З., Шилдкамп М., Валиев А. Определение сейсмических сил в зданиях со стенами из природного камня в ФДР Непал, Российской Федерации и Республике Таджикистан // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 18–45. doi: 10.37153/2618-9283-2022-6-18-45.
26. О мониторинге технического состояния жилых домов на территории города Москвы: Постановление Правительства 29.07.2003 № 619 «О проекте закона города Москвы». Правительство Москвы. 2003.
27. Charles A. Kircher. Near-Real-Time Loss Estimation Using Hazus and Shakemap Data. *SMIP03 Seminar Proceedings*. 2003.
28. FEMA. Hazus [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus> (дата обращения: 14.05.2023).
29. Zhang Y. et al. Review of Seismic Risk Mitigation Policies in Earthquake-Prone Countries: Lessons for Earthquake Resilience in the United States. *Journal of Earthquake Engineering*. 2022, vol. 26, no. 12, pp. 6208–6235. doi: 10.1080/13632469.2021.1911889.
30. Gunes O. Turkey's grand challenge: Disaster-proof building inventory within 20 years. *Case Studies in Construction Materials*. 2015, vol. 2, pp. 18–34. doi: 10.1016/j.cscm.2014.12.003.
31. Ghafory-Ashtiany M., Jafari M. H., Tehranizadeh M. Earthquake hazard mitigation achievement in Iran. *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand. 2000.
32. Protezione Civile (Dipartimento della Protezione Civile P. del C. dei M). Seismic risk [Электронный ресурс]. URL: <https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic-0/> (дата обращения: 14.05.2023).
33. Vacareanu R. et al. Seismic Vulnerability of RC Buildings in Bucharest, Romania. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
34. Turner F. Revisiting earthquake lessons - Unreinforced masonry buildings [Электронный ресурс]. URL: <https://www.seaoc.org/news/486967/Revisiting-Earthquake-Lessons%2014Unreinforced-Masonry-Buildings.htm> (дата обращения: 14.05.2023).
35. John R. Hayes J., Steven L. McCabe, Michael Mahoney. Implementation Guidelines for Executive Order 13717: Establishing a Federal Earthquake Risk Management Standard. USA. 2017. 57 p.
36. Searer G.R., Rosenboom O. Seismic Repercussions-IEBC Code Requirements Regarding Additions and Alterations. *10th National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE)*. Anchorage, Alaska. 2014.
37. McKernon W. From solar to seismic: The rise of C-PACE [Электронный ресурс]. URL: <https://cleanfund.com/> (дата обращения: 01.05.2023).
38. Kenneth W. Hudnut et al. The HayWired earthquake scenario – We can outsmart disaster. 2018. doi.org/10.3133/fs20183016.

References

1. Egbelakin T., Wilkinson S., Ingham J. Economic impediments to successful seismic retrofitting decisions. *Structural Survey*. 2014, vol. 32, no. 5, pp. 449–466.
2. Coburn A.W., Spence R.J.S., Pomonis A. Factors determining human casualty levels in earthquakes: Mortality prediction in building collapse. *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*. 1992.
3. Kenny C. Why do people die in earthquakes? The Costs, Benefits And Institutions Of Disaster Risk Reduction In Developing Countries. 2009. 114 p. doi: 10.1596/1813-9450-4823.
4. Holmes W.T. et al. Seismic Performance Objectives for Tall Buildings. 2008. 114 p.
5. Jaiswal K.S. et al. Estimating annualized earthquake losses for the conterminous United States. *Earthquake Spectra*. 2015, vol. 31, pp. 221–243. doi: 10.1193/010915EQS005M.
6. Georgescu E. S. et al. Seismic and energy renovation: A review of the code requirements and solutions in Italy and Romania. *Sustainability (Switzerland)*. 2018, vol. 10, no. 5, pp. 1561–1597. doi: 10.3390/su10051561.
7. Filippova O., Noy I. Earthquake-strengthening policy for commercial buildings in small-town New Zealand. *Disasters*. 2020, vol. 44, no. 1, pp. 179–204. doi: 10.1111/disa.12360.
8. Markhvida M., Baker J.W. Unification of seismic performance estimation and real estate investment analysis to model post-earthquake building repair decisions. *Earthquake Spectra*. 2018, vol. 34, no 4, pp. 1547–1555. doi: 10.1193/030118EQS048M.
9. Tomohiro H. The building center of Japan. *Japan*. 2013. 237 p.
10. World Bank. Converting disaster experience into a safer built environment: The case of Japan. 2018.
11. Ando S. Evaluation of the Policies for Seismic Retrofit of Buildings. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2012, vol. 6, no. 4, pp. 391–402. doi: 10.17265/1934-7359/2012.04.001.
12. Jaiswal K., Wald D.J. Creating a global building inventory for earthquake loss assessment and risk management. US Geological Survey open-file report-1160. 2008. 110 p.
13. Lee Preston B. et al. Updating the Costs of Compliance for California’s Hospital Seismic Safety Standards. 2019. 125 p.
14. Jacques C.C. et al. Resilience of the canterbury hospital system to the 2011 Christchurch earthquake. *Earthquake Spectra*. 2014, vol. 30, no 1, pp. 533–554. doi: 10.1193/032013EQS074M.
15. Hui T. The cost of compliance. San Francisco Apartment Association. 2017.
16. Pan P., Shan M. Seismic reinforcement policies for urban communities. *City and Disaster Reduction*. 2019, vol. 5, pp. 71–76.
17. Fiorentino G. et al. Damage patterns in the town of Amatrice after August 24th 2016 Central Italy earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 1399–1423. doi: 10.1007/s10518-017-0254-z.
18. Basaglia A. et al. Assessing community resilience, housing recovery and impact of mitigation strategies at the urban scale: a case study after the 2012 Northern Italy Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2020, vol. 18, no. 13, pp. 6039–6074. doi: 10.1007/s10518-020-00919-8.
19. Pinto P. E., Franchin P. Eurocode 8: Assessment and retrofitting of buildings. 2011.
20. Dolce M. The Italian national seismic prevention program. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*. Lisbon, Portugal. 2012. 24 p.
21. Cosenza E. et al. The Italian guidelines for seismic risk classification of constructions: technical principles and validation. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018, vol. 16, no. 12, pp. 5905–5935. doi: 10.1007/s10518-018-0431-8.
22. Caterino N., Cosenza E. A multi-criteria approach for selecting the seismic retrofit intervention for an existing structure accounting for expected losses and tax incentives in Italy. *Eng Struct*. 2018, vol. 174, pp. 1085–1100. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.07.090.
23. Formisano A., Vaiano G., Fabbrocino F. A seismic-energetic-economic combined procedure for retrofitting residential buildings: A case study in the Province of Avellino (Italy). *AIP Conference Proceedings*. 2019. doi: 10.1063/1.5114435.
24. Kantorovich L.V., Keylis-Borok V.I., Molchan G.I. Seismic risk and seismic zoning principles.

- Vychislitel'naya Seysmologiya*. 1974, no. 6, pp. 3–20. (In Russian)
25. Abaev Z., Schildkamp M., Valiev A. Base shear seismic demand comparison for buildings with natural stone walls in Nepal, Russia and Tajikistan. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2022, no. 6, pp. 18–45. doi: 10.37153/2618-9283-2022-6-18-45 (In Russian)
 26. The government of Moscow. Government Ordinance on the draft law of the city of Moscow “On monitoring the technical condition of residential buildings in the city of Moscow”: 619. 2021 (In Russian)
 27. Charles A. Kircher. Near-Real-Time Loss Estimation Using Hazus and Shakemap Data. SMIP03 Seminar Proceedings. 2003.
 28. FEMA. Hazus [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus> (дата обращения: 14.05.2023).
 29. Zhang Y. et al. Review of Seismic Risk Mitigation Policies in Earthquake-Prone Countries: Lessons for Earthquake Resilience in the United States. *Journal of Earthquake Engineering*. 2022, vol. 26, no. 12, pp. 6208–6235. doi: 10.1080/13632469.2021.1911889.
 30. Gunes O. Turkey’s grand challenge: Disaster-proof building inventory within 20 years. *Case Studies in Construction Materials*. 2015, vol. 2, pp. 18–34. doi: 10.1016/j.cscm.2014.12.003.
 31. Ghafory-Ashtiany M., Jafari M. H., Tehranizadeh M. Earthquake hazard mitigation achievement in Iran. *12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand. 2000.
 32. Protezione Civile (Dipartimento della Protezione Civile P. del C. dei M). Seismic risk [Электронный ресурс]. URL: <https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic-0/> (дата обращения: 14.05.2023).
 33. Vacareanu R. et al. Seismic Vulnerability of RC Buildings in Bucharest, Romania. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. 2004.
 34. Turner F. Revisiting earthquake lessons - Unreinforced masonry buildings [Электронный ресурс]. URL: <https://www.seaoc.org/news/486967/Revisiting-Earthquake-Lessons%2014Unreinforced-Masonry-Buildings.htm> (дата обращения: 14.05.2023).
 35. John R. Hayes J., Steven L. McCabe, Michael Mahoney. Implementation Guidelines for Executive Order 13717: Establishing a Federal Earthquake Risk Management Standard. USA. 2017. 57 p.
 36. Searer G.R., Rosenboom O. Seismic Repercussions-IEBC Code Requirements Regarding Additions and Alterations. *10th National Conference on Earthquake Engineering (10NCEE)*. Anchorage, Alaska. 2014.
 37. McKernon W. From solar to seismic: The rise of C-PACE [Электронный ресурс]. URL: <https://cleanfund.com/> (дата обращения: 01.05.2023).
 38. Kenneth W. Hudnut et al. The HayWired earthquake scenario – We can outsmart disaster. 2018. doi.org/10.3133/fs20183016.

Сведения об авторах / Information about the authors

Заурбек Камболатович Абаев, к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Zaurbek K. Abaev, PhD, Associate Professor, Department of Civil Engineering. FSFEI HE North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), NCIMM (STU); 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 756761, Scopus ID: 57194205721; zaurbek_a@yahoo.com.

Азамат Джониевич Валиев, аспирант. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-

металлургический институт (государственный технологический университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com.

Azamat D. Valiev, PhD student; Department of Civil Engineering. North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), FSFEI HE NCIMM (STU); 2403 VT, The Netherlands, Alphen aan den Rijn, Distelstraat 5; 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 1124556; azamat99valiev@gmail.com.

Марат Юрьевич Кодзаев, к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)», ФГБОУ ВО «СКГМИ (ГТУ)»; 362021, Республика Северная Осетия, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44; РИНЦ ID: 7389-8508; m_kodzaev@mail.ru

Marat Yu. Kodzaev, PhD, Associate Professor, Department of Civil Engineering. North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), FSFEI HE NCIMM (STU); 362021, Republic of North Ossetia - Alania, Vladikavkaz, Nikolaeva st. 44; RISC ID: 7389-8508, m_kodzaev@mail.ru

Вклад авторов:

Абаев З.К. – основная идея, сбор и обработка материала, подготовка структуры статьи и научное редактирование текста.

Валиев А.Д. – сбор и обработка материала, научное редактирование текста статьи.

Кодзаев М.Ю. – научное редактирование текста статьи.

Автор, ответственный за переписку: Валиев Азамат Джониевич, azamat99valiev@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Zaurbek K. Abaev – main idea, collection and processing of material, preparation of the structure and scientific editing of the manuscript.

Azamat D. Valiev – collection and processing of material, scientific editing of the manuscript.

Marat Yu. Kodzaev – scientific editing of the manuscript.

Corresponding author: Azamat Valiev, azamat99valiev@gmail.com

The authors declare the absence of a conflict of interest.

УДК 624.042.8

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Теоретические и экспериментальные исследования

Моделирование акселерограмм высокой интенсивности на основе вейвлет-преобразования

Харланова Светлана Владимировна¹, Харланов Владимир Леонтьевич²
^{1,2} ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
Волгоград, Российская Федерация

Аннотация: При детерминированном анализе строительных конструкций в качестве исходных данных применяют инструментальные или синтезированные акселерограммы. Как правило, на каждой площадке имеются записи землетрясений, соответствующие акселерограммам низкой интенсивности. Очень часто инструментальные записи землетрясений высокой интенсивности отсутствуют. Чтобы исправить данную ситуацию был разработан алгоритм моделирования акселерограмм низкой интенсивности к акселерограммам высокой интенсивности с помощью вейвлет-преобразования.

Для подтверждения эффективности данного алгоритма проведен сравнительный анализ спектров реакций линейных осцилляторов, а также энергетических критериев импульса и Ариаса для синтезированной и инструментальной акселерограмм.

Ключевые слова: инструментальные акселерограммы землетрясения, вейвлет-преобразование, спектры реакций, энергетические критерии

Для цитирования: Харланова С.В., Харланов В.Л. Моделирование акселерограмм высокой интенсивности на основе вейвлет-преобразования // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2023. № 3. С. 73–80.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Theoretical and experimental studies

Modeling of high-intensity accelerograms based on the wavelet transform

Svetlana V. Kharlanova¹, Vladimir L. Kharlanov²
^{1,2} FSFEI HE Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation

Abstract: In the deterministic analysis of building structures, instrumental or synthesized accelerograms are used as initial data. As a rule, earthquake records corresponding to low-intensity accelerograms are available at each site. Very often instrumental recordings of high-intensity earthquakes are missing. To correct this situation, an algorithm has been developed for modeling low-intensity accelerograms to high-intensity accelerograms using a wavelet transform.

As an efficiency of this algorithm, a comparative analysis of the reaction spectra of linear

@ S. V. Kharlanova, V. L. Kharlanov, 2023

oscillators, as well as the pulse and Arias energy criteria for synthesized and instrumental accelerograms was carried out.

Keywords: instrumental accelerograms of an earthquake, wavelet transform, reaction spectra, energy criteria

For citation: Kharlanova S.V., Kharlanov V.L. Modeling of high-intensity accelerograms based on the wavelet transform. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 73–80. [In Russian] DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-73-80](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-73-80)

Введение

В арсенале инженеров-проектировщиков имеются различные акселерограммы интенсивности: от 3–4 до 7–8 баллов по шкале МСК-64. В то же время не на каждой площадке имеются акселерограммы высокой интенсивности. Поэтому возникает задача на основе акселерограмм землетрясений малой интенсивности получить акселерограммы большей интенсивности, применяемые при расчете зданий и сооружений.

Рассмотрим две инструментальные записи землетрясений (с различной интенсивностью), зафиксированных в 1976 году на одной площадке станцией Газли: одна с максимальным ускорением $7,1 \text{ м/с}^2$, другая – $0,47 \text{ м/с}^2$. Записи землетрясений длиной 10 с приведены на рисунке 1.

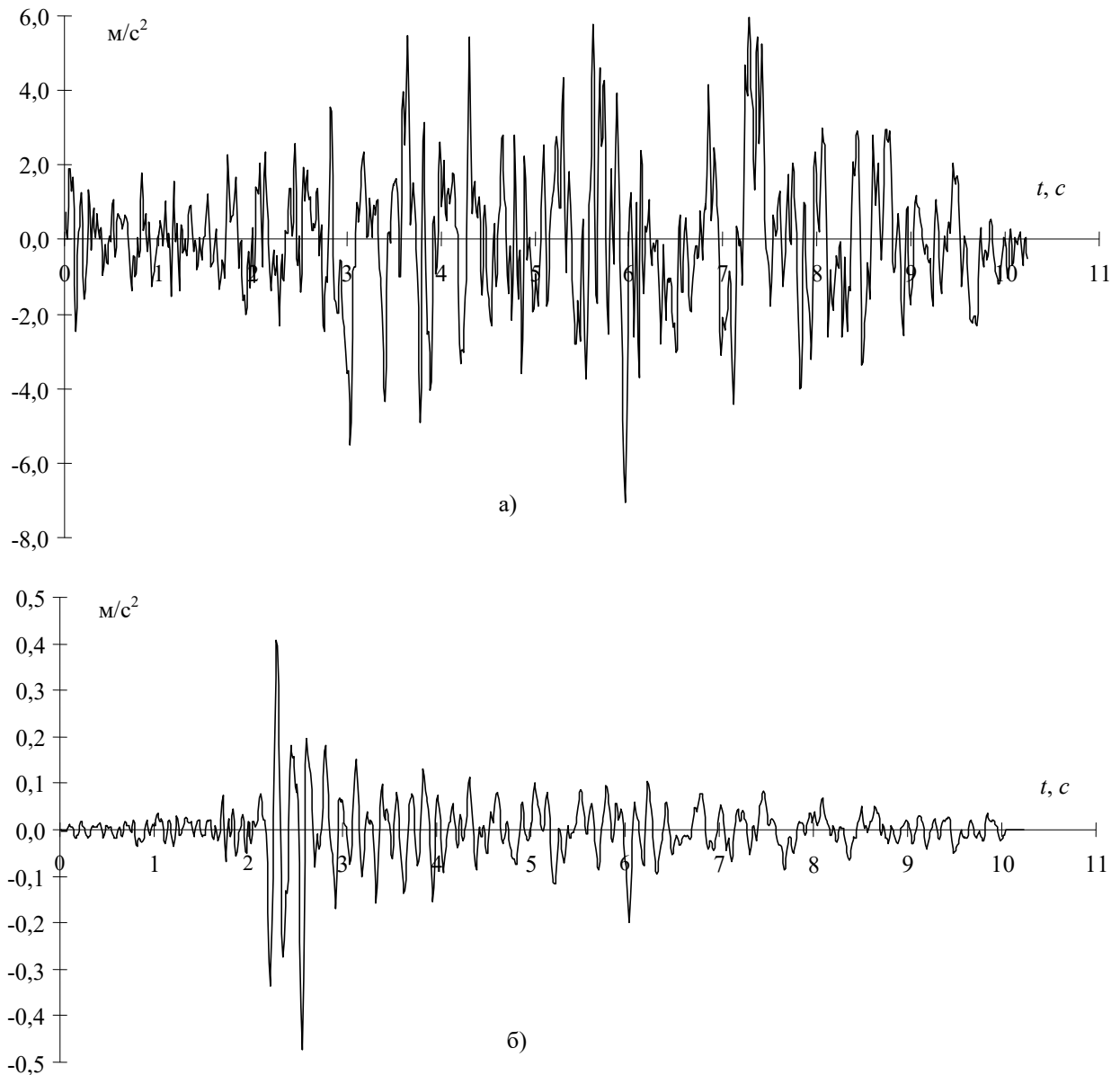


Рисунок 1 – Инструментальные акселерограммы землетрясения: а) высокой интенсивности; б) низкой интенсивности

Figure 1 – Instrumental accelerograms of an earthquake: a) high intensity; b) low intensity

Согласно шкале МСК-64 [1] критерий балльности землетрясения определяется по формуле:

$$I = 1,44 \ln (\ddot{y}_{o, \max}) + 7, R^2 = 0,7 \quad (1)$$

где I – интенсивность землетрясения, R^2 – коэффициент детерминации.

Следовательно, по формуле (1), акселерограмма 1-го землетрясения (рис. 1а) оценивается в 9 баллов, 2-го землетрясения (рис. 1б) – в 5 баллов.

Согласно требованиям [2]: «Расчёты, соответствующие контрольному землетрясению (КЗ), следует выполнять во временной области с использованием инструментальных или синтезированных акселерограмм».

Существуют различные методики построения синтезированных акселерограмм [3, 4]. Относительно новым подходом является построение синтезированных акселерограмм на основе вейвлет-преобразования [5].

В основе вейвлет-преобразования лежит разделение исходного сигнала на аппроксимирующие коэффициенты, представляющие сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, представляющие собой колебания [6].

Пусть y_i – наблюдаемое значение одномерного дискретного сигнала, представляющего собой инструментальную акселерограмму. Исходный сигнал пропускают через 2 фильтра: низкочастотный (g) и высокочастотный (h). В итоге получают 2 последовательности коэффициентов: $A_1 = \{a_{j,i}\}$ – коэффициенты аппроксимации уровня разложения 1, $D_1 = \{d_{j,i}\}$ – коэффициенты детализации уровня разложения 1. Далее коэффициенты A_1 подвергают опять разложению на $A_2 = \{a_{j+1,i}\}$ – коэффициенты аппроксимации уровня разложения 2 и $D_2 = \{d_{j+1,i}\}$ – коэффициенты детализации уровня разложения 2. Повторяя процедуру J раз, исходный сигнал схематично можно представить в виде:

$$y_i = A_1 + D_1 = A_2 + D_2 + D_1 = \dots = A_J + D_{J-1} + D_{J-2} + \dots + D_1.$$

Искомые коэффициенты $a_{j,i}$, $d_{j,i}$ находят по формулам [7]:

$$\begin{aligned} a_{j+1,i} &= \sum_n h_n a_{j,n+2i} \\ d_{j+1,i} &= \sum_n g_n a_{j,n+2i} \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_{j,i} = y_i$, $g_n = (-1)^i \cdot \overline{h_{2M-1-i}}$, $i = \overline{0, N-1}$, $2M$ – определяет число коэффициентов h_i . В качестве фильтра h применим коэффициенты вейвлета – Добеши D^8 , обладающего свойством ортогональности [8]:

$$h_0 \approx 0,2304, h_1 \approx 0,7148, h_2 \approx 0,6309, h_3 \approx -0,028, h_4 \approx -0,187, h_5 \approx 0,0308, h_6 \approx 0,0329, h_7 \approx -0,0106.$$

Формулы (2) представляют собой прямое дискретное вейвлет-преобразование исходного сигнала.

При восстановлении исходного сигнала применяют обратное дискретное вейвлет-преобразование по формуле:

$$a_{j+1,n} = \sum_i h_{n-2i} \cdot a_{j+1,i} + \sum_i g_{n-2i} \cdot d_{j+1,i} \quad (3)$$

Более подробно о вейвлет-преобразовании приведено в работе [9].

Для моделирования синтезированной акселерограммы с высокой интенсивностью применим следующий алгоритм:

- 1) разложим исходный сигнал y_i инструментальных акселерограмм, представленных на рис. 1, на коэффициенты $a_{j,i}$ и $d_{j,i}$: коэффициенты $a_{j,i}^1$ и $d_{j,i}^1$ соответствуют акселерограмме высокой интенсивности, а $a_{j,i}^2$ и $d_{j,i}^2$ – низкой интенсивности.
- 2) при восстановлении исходного сигнала по формулам (3) в качестве $a_{j,i}$ возьмем коэффициенты $a_{j,i}^1$, а в качестве коэффициентов $d_{j,i}$: – коэффициенты $d_{j,i}^2$.

В результате применения данного алгоритма получим синтезированную акселерограмму высокой интенсивности, представленную на рисунке 2.

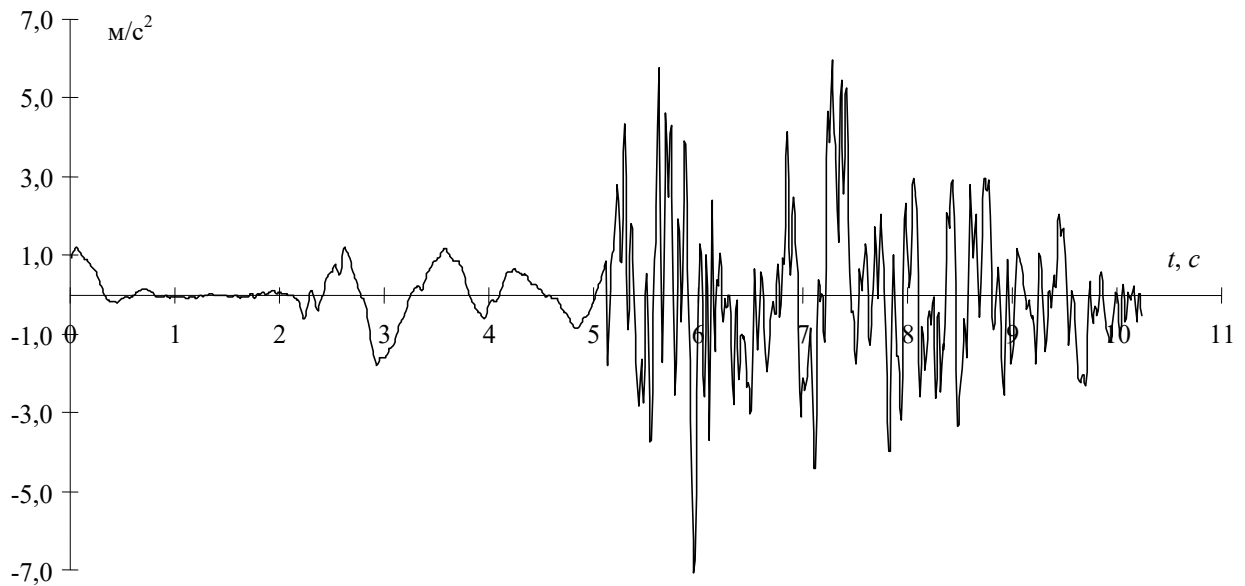


Рисунок 2 – Синтезированная акселерограмма на основе вейвлет-преобразования

Figure 2 – Synthesized accelerogram based on the wavelet transform

На рисунке 3 представлены спектры реакций линейных осцилляторов для инструментальных акселерограмм низкой и высокой интенсивностей и смоделированной акселерограммы.

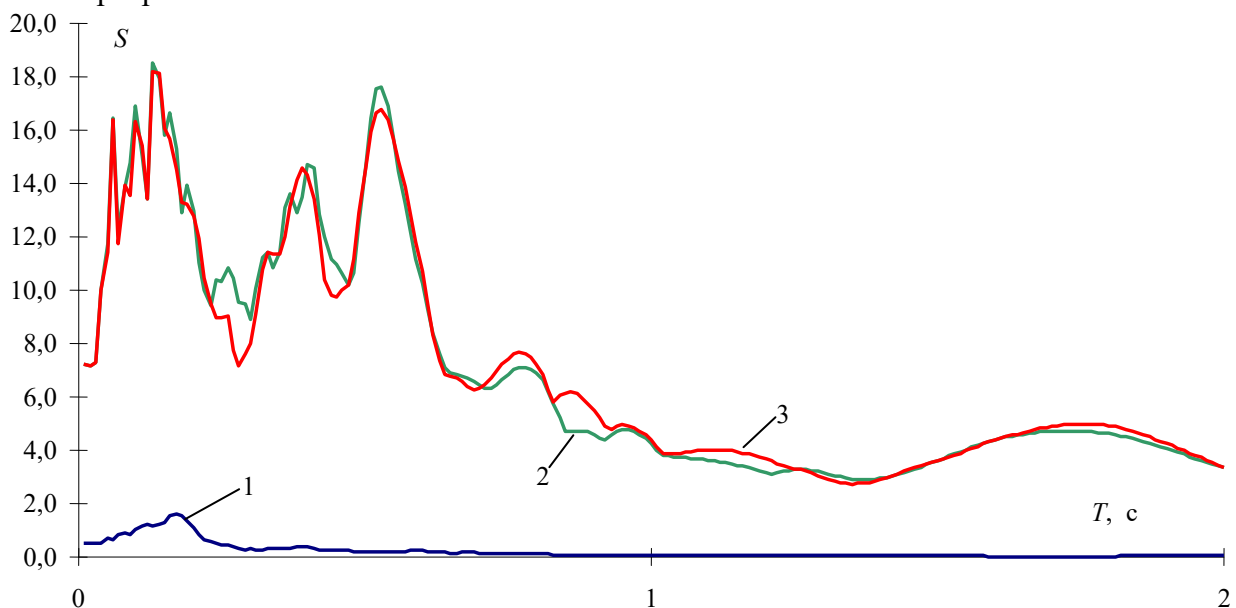


Рисунок 3 – Спектры реакций линейных осцилляторов: 1 – инструментальной акселерограммы низкой интенсивности; 2 – инструментальной акселерограммы высокой интенсивности; 3 – синтезированной акселерограммы

Figure 3 – Reaction spectra of linear oscillators: 1 – instrumental accelerogram of low intensity; 2 – instrumental accelerogram of high intensity; 3 – synthesized accelerogram

Из рисунка 3 следует, что спектры реакций синтезированной и инструментальной высокой интенсивности акселерограмм близки между собой.

Сравним энергетические критерии: критерий импульса и критерий Ариаса [10, 11], синтезированной и инструментальных акселерограмм, приведенных в таблице.

Таблица

Table

Критерий	Инструментальная акселерограмма низкой интенсивности	Инструментальная акселерограмма высокой интенсивности	Синтезированная акселерограмма с помощью вейвлет-преобразования
Импульс	0,39	12,95	9,28
Ариас	0,04	28,75	19,52

Из таблицы следует, что энергетические критерии синтезированной акселерограммы на 30% меньше инструментальной высокой интенсивностью, но в десятки раз больше, чем у инструментальной акселерограммы низкой интенсивностью.

Расчеты, выполненные в данной работе, сделаны по авторской методике с использованием открытой среды программирования Lazarus.

Выводы

1. Разработан алгоритм преобразования акселерограммы низкой интенсивности в акселерограмму высокой интенсивности с помощью вейвлет-преобразования.
2. Спектры реакций линейных осцилляторов преобразованной и исходной акселерограмм близки между собой.
3. Энергетические критерии преобразованной акселерограммы возросли в десятки раз по сравнению с инструментальной низкой интенсивности.
4. Предложенный алгоритм может быть использован на площадках с отсутствующими записями инструментальных акселерограмм высокой интенсивности.

Список литературы

1. Медведев С.В. Международная шкала сейсмической интенсивности. Сейсмостойкое строительство. Москва: Наука. 1968. 476 с.
2. СП 14.13330.2018. «Строительство в сейсмических районах» / Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: ОАО «ЦПП». 2018. 126 с.
3. Ицков И.Е., Чернов Н.Б. Использование акселерограмм, созданных по заданным спектрам реакции, для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2001. № 4. С. 7–12.
4. Хачиян Э.Е. Метод получения синтетической акселерограммы грунта по модели землетрясения как мгновенного разрыва среды // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2009. № 5. С.19–23.
5. Решетов А.А. Моделирование акселерограмм землетрясений в виде нестационарного случайного процесса: автореферат дисс. к.т.н.: 05.23.17 / А.А. Решетов / Место защиты: Моск. гос. строит. ун-т. Москва. 2013.19 с.
6. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166. № 11. С.1145 – 1170.
7. Воскобойников Ю. Е. Вейвлет-фильтрации сигналов и изображений (с примерами в пакете Mathcad): монография / Ю. Е. Воскобойников; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин). Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). 2015. 188 с.
8. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2001. 464 с.

9. Харланова С.В., Харланов В.Л. Применение вейвлет-преобразования в фильтрации шума реальных акселерограмм землетрясений // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2021. № 3. С.19–27. DOI 10.3715312618-9283-2021-3-19-27.
10. EPRI TR-100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in: *Seismic design for nuclear power points* edited by Hansen R.J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438–483.

References

1. Medvedev S.V. Mezhdunarodnaya shkala sejsmicheskoy intensivnosti. *Sejsmorajonirovanie SSSR*. Moscow: Nauka. 1968. 476 p. [In Russian]
2. SP 14.13330.2018. "Stroitelstvo v sejsmicheskikh rajonah". Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-7-81*. Moscow: OAO "TsPP". 2018.126 p. [In Russian]
3. Itskov I.E., Chernov N.B. Ispolzovanie akselerogram, sozdannyeh po zadannym spektram reaktsii, dlya otsenki sejsmostojkosti zdaniy i sooruzhenij. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2001, no. 4, pp. 7–12. [In Russian]
4. Hachiyani E.E. Metod polucheniya sinteticheskoy akselerogrammy ghrunta po modeli zemletryaseniya kak mghnovennogo razryeva sredye. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2009, no. 5, pp. 19–23. [In Russian]
5. Reshetov A.A. Modelirovanie akselerogram zemletryaseniya v vide nestatsionarnogo sluchajnogho protsessa: avtoreferat diss. k.t.n.:05.23.17/ A.A. Reshetov/ Mesto zashchitye: Mosk. gos. stroit. un-t. Moskva. 2013. 19 p. [In Russian]
6. Astafeva N.M. Veivlet-analiz: osnovnye teorii i primerye primeneniya. *Uspehi fizicheskikh nauk*. 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145 – 1170. [In Russian]
7. Voskoboynikov Yu.E. Veivlet-filtratsii signalov i izobrazhenij (s primerami v pakete Mathcad): monografiya / Yu.E. Voskoboynikov; Novosib. gos. arhitektur.-stroit. un-t (Sibstrin). Novosibirsk: NGHASU (Sibstrin). 2015. 188 p. [In Russian]
8. Dobeshi I. Desyat lektsij po veivletam. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika". 2001. 464 p. [In Russian]
9. Harlanova S.V., Harlanov V.L. Primenenie veivlet-preobrazovaniya v filtratsii shuma realnyeh akselerogram zemletryaseniya. *Sejsmostojkoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenij*. 2021, no. 3, pp. 19–27. DOI 10.3715312618-9283-2021-3-19-27. [In Russian]
10. EPRI TR-100082. Standardization of the Cumulative Absolute Velocity, Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, prepared by Yankee Atomic Electric Company, December 1991.
11. Arias A. A measure of earthquake intensity, in: *Seismic design for nuclear power points* edited by Hansen R.J., MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970, pp. 438–483.

Информация об авторах / Information about authors

Харланова Светлана Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математические и естественнонаучные дисциплины». ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация
e-mail: svetlh@mail.ru

Svetlana V. Kharlanova, Cand. Sci. (Engineering), associate Professor of the Department of Mathematical and Natural Sciences. FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

Харланов Владимир Леонтьевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений». ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет». Волгоград, Российская Федерация
e-mail: harlanovvl@yandex.ru

Vladimir L. Kharlanov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department "Building constructions, bases and reliability of structures". FSFEI HE Volgograd State Technical University. Volgograd, Russian Federation

УДК: 626/627.01.34.096

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

Проектирование, строительство и реконструкция сейсмостойких зданий и сооружений

Обеспечение сейсмостойкости гидротехнических сооружений при землетрясениях

Калиберда Инна Васильевна¹, Пименов Владимир Иванович²

¹ ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность».

Москва, Российская Федерация

² Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Москва, Российская Федерация

Аннотация: В России в зонах высокой сейсмичности (7 и более баллов) размещено значительное число гидроэлектростанций (далее – ГЭС). Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (далее – ГТС) ГЭС при землетрясениях является актуальной задачей. Авторами статьи указывается на отсутствие достаточных обоснований сейсмостойкости ГТС по причине того, что нормативное регулирование безопасности ГТС при сейсмических воздействиях получило развитие в России и за рубежом только в конце 20 века, поэтому находящиеся уже длительное время в эксплуатации ГТС не проектировались с учетом сейсмических воздействий. В связи с этим существует риск их уязвимости при землетрясениях. В статье приводится краткий обзор зарубежного опыта по обеспечению сейсмостойкости плотин, находящихся в эксплуатации. Приводится обзор с оценкой полноты и достаточности положений и требований действующей нормативной базы по обеспечению сейсмостойкости гидротехнических сооружений в Российской Федерации, разработанной в начале 21 века. Основные положения и обязательные требования к обеспечению сейсмостойкости относятся к этапам проектирования и строительства. Для находящихся в длительной эксплуатации комплексов ГТС ГЭС применение этих предлагаемых методов требует индивидуального подхода. Авторами статьи указывается на необходимость разработки нормативного обеспечения для управления безопасностью ГТС, находящихся в длительной эксплуатации на сейсмически опасных территориях.

Ключевые слова: гидроэлектростанции, гидротехнические сооружения, землетрясения, федеральные законы, нормативные правовые акты, сейсмостойкость, риски, безопасность

Для цитирования: Калиберда И.В., Пименов В.И. Обеспечение сейсмостойкости гидротехнических сооружений при землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2023. № 3. С. 81–93.

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

@ I.V. Kaliberda, V.I. Pimenov, 2023

Design, building and reconstruction of aseismic constructions

Ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in case of earthquakes

Kaliberda Inna V.¹, Pimenov Vladimir I.²

¹ Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”.
Moscow, Russian Federation

² Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision).
Moscow, Russian Federation

Abstract: A significant number of hydroelectric power plants (hereinafter referred to as HPPs) are located in areas of high seismicity (7 or more points) in Russia. Ensuring the safety of hydraulic structures (hereinafter – GTS) Hydroelectric power plants in case of earthquakes is an urgent task. The authors of the article point out the lack of sufficient justification for the seismic resistance of the GTS due to the fact that the regulatory regulation of the safety of GTS under seismic impacts was developed in Russia and abroad only at the end of the 20th century, therefore, the GTS that have been in operation for a long time were not designed taking into account seismic impacts. In this regard, there is a risk of their vulnerability to earthquakes. The article provides a brief overview of foreign experience in ensuring earthquake resistance of dams in operation. An overview is given with an assessment of the completeness and sufficiency of the provisions and requirements of the current regulatory framework for ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in the Russian Federation, developed at the beginning of the 21st century. The main provisions and mandatory requirements for ensuring earthquake resistance relate to the stages of design and construction. For GTS HPP complexes in long-term operation, the application of these proposed methods requires an individual approach. The authors of the article indicate the need to develop regulatory support for the safety management of GTS in long-term operation in seismically hazardous areas.

Keywords: hydroelectric power plants, hydraulic structures, earthquakes, federal laws, regulatory legal acts, earthquake resistance, risks, safety

For citation: Kaliberda I.V., Pimenov V.I. Ensuring earthquake resistance of hydraulic structures in case of earthquakes. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2023, no. 3, pp. 81–93. [In Russian]

DOI [10.37153/2618-9283-2023-3-81-93](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2023-3-81-93)

Введение

На отдельных территориях Российской Федерации периодически возникают землетрясения. Основными сейсмически активными точками являются территории на Камчатке, Восточной Сибири, Кавказе, Алтае, Сахалине, а также Курильские острова и другие горные местности.

В ФБУ «НТЦ Энергобезопасность» – подведомственной организации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2014 году были выполнены предварительные оценки возможной уязвимости гидротехнических сооружений (далее – ГТС) гидроэлектростанций (далее – ГЭС), находящихся в эксплуатации, при землетрясениях. Сейсмические условия определялись по картам сейсмического районирования, на которых приводится информация о фоновой сейсмичности территорий. Для ГТС ГЭС принималась карта ОСР–97 С, которая была действующей в это время.

В зонах высокой сейсмичности (7 и более баллов) размещено 187 ГЭС различного типа и различной мощности, при этом в зоне с сейсмичностью района 8 баллов и выше размещено 129 ГЭС. Эти ГЭС расположены в следующих регионах: Кабардино-Балкарская Республика, Камчатский край, Краснодарский край, Республика Дагестан, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Северная Осетия-Алания, Ставропольский край.

Согласно полученной информации о размещении ГТС ГЭС на территории Российской Федерации можно заключить, что обеспечение безопасности ГТС при землетрясениях и связанных с землетрясениями процессов, явлений и факторов природного и техногенного происхождения является актуальной задачей.

Общая информация о гидротехнических сооружениях на гидроэлектростанциях

В настоящее время в Российской Федерации многие ГТС ГЭС находятся в эксплуатации длительное время. Гидроэлектростанция является составной частью гидроузла – комплекса гидротехнических сооружений, объединенных по расположению и совместному функционированию. Гидротехнические сооружения ГЭС – плотины, здания гидроэлектростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники и другие сооружения.

Гидроэлектростанции в России имеют большое разнообразие компоновочных решений: русловые, приплотинные, деривационные, гидроаккумулирующие. Проектно-конструкторские решения ГТС ГЭС также разнообразны: бетонные арочные, бетонные гравитационные, бетонные гравитационного типа с расширенными швами, бетонные массивно-контрфорсные, каменно-набросные, земляные насыпные, земляные намывные плотины.

Существенными факторами эксплуатации ГТС ГЭС являются уникальные условия их размещения на водных объектах, на равнине и в ущельях, на сложных грунтах, на вечной мерзлоте, на территориях возможных внешних воздействий природного и техногенного происхождения, в том числе сейсмической опасности. В ряде случаев ГЭС входят в состав каскадов ГЭС, функционирующих на взаимосвязанных водных объектах.

Таким образом, ГТС ГЭС разных конструктивных решений представляют собой сложные технические системы, включающие комплекс систем и элементов, характеризующихся особенными внутренними связями и зависимостями, системами управления технологическими процессами, различными техническими состояниями объектов. Они требуют индивидуального подхода в части выполнения конкретных оценок безопасности и сейсмостойкости на этапах жизненного цикла, в том числе на этапе эксплуатации.

Об обеспечении сейсмостойкости ГТС ГЭС

Большинство из находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС проектировались много лет назад без учета сейсмических воздействий, так как не было требований по обеспечению их сейсмостойкости в нормативных документах. Это не означает, что ГТС ГЭС являются не сейсмостойкими. Как правило, для условий среднего уровня сейсмичности (5-7 баллов по шкале MSK-64) существующие конструктивные решения бывают в основном достаточны для обеспечения безопасности. Встаёт вопрос – всегда ли следует добиваться приведения технического состояния ГТС ГЭС - объекта, находящегося в эксплуатации длительное время, размещённого в зонах сейсмической опасности 7 – 9 баллов, в соответствие с современными требованиями сейсмостойкости, установленными в нормах [1, 2, 3].

С одной стороны, объект безопасно эксплуатируется уже длительный срок, оставшийся срок эксплуатации сокращается с каждым годом, в то время как сейсмические мероприятия потребуют инвестирования средств в таком объёме, как если бы этот объект проектировался в сейсмостойком исполнении с самого начала. С другой стороны, не придавать этому факту достаточного внимания также не имеется оснований. В любом случае необходимо иметь достаточную информацию, чтобы оценить существующую ситуацию и выработать оптимальный подход к решению проблемы обеспечения сейсмостойкости ГТС (без лишних затрат и не во вред безопасности).

ГЭС не выполняются по типовым проектам, поэтому накопить практический опыт по значениям допустимых сроков службы ГТС ГЭС также трудно, особенно при разных условиях их размещения. Понятно, что ресурс ГТС, его систем и элементов сокращается с каждым годом, также снижается его запас устойчивости к сейсмическим воздействиям. Поэтому, чтобы управлять сроком эксплуатации ГТС в условиях повышенной и высокой сейсмичности территории их размещения необходимо иметь реальные сведения о техническом состоянии ГТС и о фактических характеристиках сейсмической опасности. Для этого изучается исходная проектная документация, определяется степень соответствия проектных параметров и физического состояния ГТС современным критериям безопасности и решается вопрос о сохранении существующего сооружения, опять же с учётом экономической целесообразности приведения его в соответствие современным критериям безопасности и сейсмостойкости, либо о его консервации или ликвидации.

Одним из способов получения достаточной информации является использование метода оценок сейсмического риска. Однако его применение требует кроме наличия надёжной исходной базы данных, методов анализа, расчетных программных средств, также проведение анализа надёжности и сейсмостойкости практически всех ГТС, их систем и элементов.

Международный опыт

Неопределенность данных о количестве, размерах и местоположении будущих землетрясений инженеры выражают через сейсмический риск в виде функции периодов повторяемости землетрясений [4].

Швейцарские специалисты считают, что существующие риски для гидросооружения могут быть минимизированы, но никогда не исключены полностью, даже если плотина спроектирована и сооружена в соответствии с новейшим уровнем знаний в данном вопросе [5]. Именно поэтому, по мнению швейцарских специалистов [5, 6], необходимо своевременно выявлять и определять любые признаки аномального поведения, повреждений, недостатков в безопасности гидросооружений, а также выявлять новые виды потенциальных угроз и дефициты безопасности на ранних стадиях эксплуатации сооружения с тем, чтобы своевременно принимать корректирующие меры. В числе основных факторов, влияющих на срок службы ГТС, являются изменения проектных критериев (главным образом, касающихся гидрологической и сейсмической безопасности), которые вносятся как результат накопления новой информации, полученной с момента разработки первоначального проекта плотины.

В число других факторов, которые снижают ресурс безопасной эксплуатации при землетрясениях, входят старение строительных конструкций, материалов и элементов основания плотины по причине химических процессов, физических и механических процессов, биологических процессов, фильтрации в основании. Однако определить надёжно запасы ресурса комплекса ГТС ГЭС на его эксплуатацию за длительный период, по мнению швейцарских ученых, не представляется возможным. По их мнению, этот вопрос должен решаться путём периодической оценки на основе пошагового анализа.

В ряде стран, например, в Швейцарии для проектов гидросооружений принято использовать комплексную концепцию интегральной безопасности [5, 6]. Основными целями применения данной концепции являются: минимизация всех возможных рисков и учёт остаточного риска наилучшим образом из всех возможных, и при этом – принятие мер реагирования в случае возникновения нештатных ситуаций. Согласно этой комплексной концепции, интегральная безопасность включает в себя четыре наиболее значимых элемента: конструкционная безопасность; мониторинг состояния безопасности плотины; эксплуатационная безопасность и техническое обслуживание; противоаварийное планирование. При этом советуют критерии проектирования и саму концепцию проекта периодически пересматривать с тем, чтобы убедиться, что безопасность сооружения по-прежнему гарантирована с точки зрения современного понимания безопасности и с учетом накопленных сведений о возможных сейсмических воздействиях и о техническом состоянии самого объекта.

О прогнозе землетрясений

В условиях эксплуатации в зонах повышенной сейсмической опасности прогноз сейсмостойкости и продолжительности безопасной эксплуатации ГТС ГЭС также затруднителен по причине недостаточной надёжности прогноза землетрясения. Несмотря на проводимые научные исследования предсказать землетрясение с соответствующей степенью достоверности сложно. Землетрясения, которые произошли в мире в последние годы, были предсказуемы, но время их возникновения, возможный очаг землетрясения, глубина его нахождения, магнитуда в очаге землетрясения, интенсивность сейсмических колебаний в эпицентре и в соответствующих точках на поверхности земли на территориях, куда «дошли» колебания, в местах размещения объектов гражданского строительства, критически важных объектов промышленности, объектов социальной сферы, электроэнергетики, гидроузлов в основном спрогнозировать заблаговременно не удаётся.

Надёжного способа предвидеть это явление природы не существует, хотя над проблемой издавна работают ученые многих стран. Например, если толчки произошли где-то на большой глубине, то на поверхности они могут практически не ощущаться или быть слабыми. И наоборот, когда очаг землетрясения находится где-то близко к поверхности земли, то толчки гораздо меньшей магнитуды на поверхности могут ощущаться сильнее, а последствия их могут быть разрушительными. Очаг землетрясения в самом обобщенном виде описывается таким параметром, как магнитуда. Волна от очага распространяется во все стороны, вызывая сотрясения на поверхности Земли. Их интенсивность оценивается по 12-балльной шкале: американские сейсмологи используют шкалу Меркалли, российские — шкалу MSK-64, в Европе – EMS-98. Все они, в принципе, близки. Магнитуда (а именно эту шкалу придумал Чарльз Рихтер) применяется для оценки силы землетрясения в очаге по выделившейся в виде сейсмических волн энергии. Это безразмерная величина вычисляется как логарифм от количественных показателей землетрясения [7].

При описании крупных землетрясений применяют моментную магнитуду. Она основана на сейсмическом моменте, который характеризует вызванные землетрясением деформации в зоне тектонического разрыва. Тектонические процессы приводят к землетрясениям. Долгосрочные прогнозы, которые оперируют промежутками в десятки и сотни лет, ученые делать умеют. Если где-то однажды было землетрясение большой силы, логично предположить, что оно может случиться вновь. Этот принцип является основой для составления карт сейсмического районирования [2]. На основании этих карт разрабатываются нормы сейсмической устойчивости для зданий и сооружений. Но для каждого конкретного случая необходимо проводить геологические и сеймотектонические исследования, проверять реакцию грунта на нагрузку. В результате

можно получить оценку того, какие сейсмические движения можно ожидать на площадке размещения объекта. Могут быть и среднесрочные прогнозы — они предсказывают, какие землетрясения могут произойти в интервале от года до десятилетия. Но их точность не слишком велика. Поэтому всегда необходимо иметь дополнительные геофизические данные, которые могли бы служить индикаторами приближающегося события, способствовали предсказывать место, время, магнитуду прогнозируемого события с достаточной степенью надёжности, а ошибки предсказаний должны быть минимальными, время реализации события достоверным. Каждое землетрясение уникально, даже те, которые происходят в одном и том же месте в разные годы, потому что геологическая среда в сейсмоактивной зоне после любого толчка перестраивается, а как именно — это можно узнать только по результатам изысканий.

Изложенная выше информация свидетельствует о том, что для снижения уязвимости ГТС ГЭС при землетрясении необходимо принимать заблаговременные меры.

Методы прогноза параметров сейсмических воздействий

Как уже отмечалось выше, прогноз сейсмических воздействий является важной составляющей анализа сейсмостойкости сооружений.

Для определения сейсмических воздействий может быть использован любой из перечисленных ниже методов (подходов) или их комбинаций, которые можно объединить в три основные группы [7]:

А. Методы, использующие записи сильных землетрясений максимального расчетного уровня, имевших место на площадке, или имеющиеся аналоговые записи сильных землетрясений.

Б. Методы, основанные на моделях разлома:

- теоретический метод;
- полуэмпирический метод.

В. Методы, использующие стандартные спектры:

- методы синтеза (моделирования, генерации) расчетных акселерограмм и спектров реакций с установленными оценками параметров движений грунта при расчетных воздействиях во временной или (и) спектральной форме.

В целом сейсмические воздействия в зависимости от степени изученности сеймотектонических и грунтовых условий площадки, наличия информации об истории землетрясений в этом регионе, полноты информации могут быть определены любым из методов или несколькими методами одновременно: нормативным, эмпирическим, полуэмпирическим и аналитическим. Применимость каждого из использованных методов должна быть обоснована в приложениях к конкретной задаче. Но должны быть получены наиболее вероятные значения параметров сейсмических воздействий с оценкой их неопределённости. Исходные акселерограммы должны быть отобраны, модифицированы, либо получены численными методами таким образом, чтобы их временные параметры (длительность акселерограмм, огибающая колебаний) и амплитудные параметры (пиковое ускорение, пиковая скорость, пиковые перемещения) соответствовали тем, которые определены для площадки по ее макросейсмическим характеристикам на основе анализа взаимодействия грунта и сооружения.

Наиболее распространенным подходом к моделированию взаимодействия сооружений с грунтом является применение подхода «платформенная модель», при котором сейсмическое воздействие подается на жесткую платформу, на которой с помощью некоторого подвеса закреплена модель сооружения. Подвес включает в себя распределенные пружины и демпферы. Преимущество «платформенной модели» заключается в том, что ее расчет можно проводить с помощью тех же программ, что и расчет сооружения на жестком основании.

О комплексном подходе при проведении оценок сейсмостойкости

Можно согласиться с автором работы [5], что соответствие ГТС проектной документации, выпущенной в предшествующий период, не является обоснованием его безопасности и сейсмостойкости. При продлении срока службы ГТС его остаточный ресурс должен определяться с учётом современных требований по обеспечению безопасности и новых данных о сейсмической опасности, данных об изменении гидрологических режимов, других внешних воздействиях с учетом тенденций изменения климата, результатов визуальных осмотров и иных обследований, измерений и расчетов.

В [8] обосновывается важность применения комплексного подхода к анализу и обеспечению сейсмостойкости объектов энергетики. Это относится также к ГТС на всех этапах их жизненного цикла с учетом изменяющихся свойств их систем, элементов, конструкций.

Комплексный подход к исследованию сейсмостойкости сооружений и конструкций может быть представлен в виде четырёх основных этапов:

- определение исходных параметров колебаний грунта на площадке размещения ГЭС.
- анализ взаимодействия грунтов и сооружений (конструкций).
- динамический анализ параметров колебаний узлов и элементов сооружений (конструкций) для разных уровней (отметок) их нахождения в сооружении.
- сейсмический анализ прочности (устойчивости) сооружений (конструкций), зданий ГЭС, их систем и элементов, механического оборудования.

Для проведения оценок сейсмостойкости систем и элементов, входящих в состав плотин, сооружений, конструкций, здания ГЭС и расположенных на разных уровнях относительно основания сооружения, необходимо использовать поэтажные акселерограммы, полученные с применением динамического анализа параметров колебаний сооружения (частот и форм собственных колебаний, скоростей, перемещений).

О современной нормативной базе, применимой для ГТС ГЭС

Как уже отмечено ранее в настоящей статье, можно себе позволить утверждать, что нормативной базы по обеспечению сейсмостойкости гидротехнических сооружений не было в России, как и за рубежом. В 1997 году была введена в действие Общая карта сейсмического районирования России ОСР-97. Начиная с 2000-х годов разрабатывается и совершенствуется нормативная база в Российской Федерации, устанавливающая положения, обязательные требования и рекомендации для обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений, включая гидротехнические сооружения. Согласно изложенным в законодательных и иных нормативных правовых актах, стандартах Российской Федерации положениям и требованиям необходимо осуществлять прогноз и оценки сейсмических воздействий, выбор методов расчета, оценки взаимодействия сооружений с основанием, оценки сейсмостойкости ГТС, иных сооружений и конструкций.

В статье 9 Федерального закона от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (далее – Федеральный закон № 384-ФЗ) [1] установлено, что «здание или сооружение на территории, на которой возможно проявление опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, должно быть спроектировано и построено таким образом, чтобы в процессе эксплуатации здания или сооружения опасные природные процессы и явления и (или) техногенные воздействия не вызывали последствий», указанных в статье 7 Федерального закона № 384-ФЗ, и (или) иных событий, создающих угрозу причинения вреда жизни или здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или

муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений.»

В пунктах 12 и 25 статьи 9 Федерального закона № 384-ФЗ приводится перечень опасных природных процессов и явлений, техногенных воздействий; в пункте 26 определяется, что требования безопасности обеспечиваются в соответствии с уровнем ответственности (характеристикой) здания или сооружения, определяемым в соответствии с объемом экономических, социальных и экологических последствий его разрушения.

Согласно [2] интенсивность сейсмических воздействий в баллах (фоновая сейсмичность) для района строительства следует принимать на основе комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-2015), утверждённых Российской Академией Наук (этот комплект карт был введен взамен комплекта карт ОСР-97). Комплект карт ОСР-2015 предусматривает осуществление антисейсмических мероприятий при строительстве объектов и отражает 10%-ную — карта А, 5%-ную — карта В, 1%-ную — карта С вероятности возможного превышения (или 90%-ную, 95%-ную и 99%-ную вероятности непревышения) в течение 50 лет указанных на картах значений сейсмической интенсивности.

Как уже отмечалось ранее в настоящей статье, предсказание максимально ожидаемых магнитуд землетрясений в определённом районе, в том числе на основе результатов статистической обработки инструментальных сейсмических наблюдений за землетрясениями до начала строительства принципиально невозможно, поскольку продолжительность инструментальных исследований на несколько порядков меньше необходимого для этой цели времени. Поэтому раскрытие неопределенностей всегда носит экспертный характер.

В [2] устанавливаются требования для ГТС, размещаемых или расположенных в районах с нормативной сейсмичностью, равной 6 баллам и более по карте С (со средним периодом повторяемости воздействия один раз в 5000 лет), действующего комплекта карт ОСР-2015. Там же в п. 4.2 изложены требования для обеспечения сейсмостойкости проектируемых, строящихся и эксплуатируемых ГТС. Указывается на необходимость выполнения комплекса расчетов по оценке прочности и устойчивости сооружений и их элементов с учетом взаимодействия ГТС с основанием и водохранилищем; применения конструктивных решений и материалов, повышающих сейсмостойкость ГТС; установления исходной и расчетной сейсмичности площадки строительства, наличия опасных процессов и явлений, которые могут реализоваться по причине колебаний грунта в процессе землетрясения на территории, определения расчетных сейсмических воздействий, получение при необходимости набора акселерограмм для этих воздействий; проведения в процессе эксплуатации сооружения мониторинга опасных геодинамических явлений; обследования состояния ГТС и их оснований после каждого перенесенного землетрясения интенсивностью 5 баллов и более. Достаточно полный список проблем, задач и работ, которые следует принимать во внимание и которые необходимо учитывать и выполнять.

Согласно п. 4.3. [2] устанавливаются два уровня сейсмических воздействий. Это уровень максимального расчетного землетрясения (МРЗ) и уровень проектного землетрясения (ПЗ). При этом ГТС должны воспринимать МРЗ без угрозы собственного разрушения, без угрозы прорыва напорного фронта. Сейсмические воздействия уровня ПЗ должны восприниматься ГТС без угрозы для жизни и здоровья людей и с сохранением собственной ремонтпригодности. При этом допускаются остаточные смещения, деформации, трещины и иные повреждения. Устанавливается требование использовать карту ОСР-С (повторяемость 1 раз в 5000 лет) при расчете на МРЗ водоподпорных сооружений классов I, II и III; ОСР-В (повторяемость 1 раз в 1000 лет) - при расчете на МРЗ водоподпорных сооружений класса IV и безнапорных ГТС; ОСР-А (повторяемость 1 раз в 500 лет) - при расчете на ПЗ ГТС всех классов и видов.

Как уже отмечено выше, для определения нормативной сейсмичности района строительства необходимо использовать действующую систему нормативных карт А, В, С ОСР- 2015.

Для проектных основ исходную сейсмичность площадки размещения ГТС для МРЗ и ПЗ рекомендуется определять по результатам детального сейсмического районирования (далее – ДСР). При этом должна быть составлена сеймотектоническая модель сейсмического района расположения объекта, содержащая карту основных зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) с параметрами сейсмических воздействий (максимальные магнитуды, глубины очагов и эпицентральные расстояния, повторяемость землетрясений).

В случаях, когда нормативная сейсмичность района для требуемого периода повторяемости превышает 9 баллов, исходную сейсмичность площадки ГТС независимо от вида и класса ГТС следует определять на основе ДСР.

Согласно [2] сейсмические воздействия следует учитывать в тех случаях, когда значение величины сейсмического воздействия составляет 7 баллов и более для уровня МРЗ. Оценку прочности и устойчивости для всех сооружений проводить со значением коэффициента надежности по ответственности сооружения, равное 1,10.

При расчете сооружения на действие ПЗ в особое сочетание нагрузок и воздействий включают нагрузку от сейсмического воздействия интенсивностью, отвечающей ПЗ. Изложенные в [2] обязательные требования применяются для зданий и сооружений. Они также распространяются на гидротехнические сооружения разного назначения.

В Градостроительном кодексе Российской Федерации (далее - ГК РФ) приводится список объектов, которые могут относиться к особо опасным, технически сложным или уникальным объектам. Согласно ГК РФ к технически сложным объектам относятся ГТС первого и второго классов ответственности.

В СП 58.13330.2019. «Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003» [3] содержатся дополняющие положения в отношении ГТС, изложенные в [2]. Устанавливается, что расчет сейсмостойкости напорных ГТС, класс которых определен в зависимости от их социально-экономической ответственности и условий эксплуатации согласно [3], допускается, при надлежащем обосновании, выполнять на уровне сейсмических воздействий методами, соответствующими классам, определенным для этих ГТС в зависимости от их высоты и типа грунтов оснований. Для проведения расчетов сейсмостойкости ГТС необходимо применять метод динамического анализа (линейный или нелинейный) и линейно спектральный метод. Устойчивость ГТС и их оснований с учетом сейсмических нагрузок следует проверять в соответствии с указаниями СП 23.13330.2018. «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений» [9] и СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» [10].

В разделе 7 [3] приводятся требования по повышению сейсмостойкости ГТС, которые имеют конструктивный характер, при проектировании и строительстве ГТС.

Гидротехнические сооружения, их конструкции и основания, как правило, проектируются таким образом, чтобы условие недопущения наступления предельных состояний соблюдалось на всех этапах их строительства и эксплуатации, в том числе и в конце назначенного срока их службы. В соответствии с СП 58.13330.2019 [3] проектный срок службы ГТС определен продолжительностью 100 лет для ГТС первого и второго классов ответственности. Для ГТС третьего и четвертого классов ответственности срок службы составляет 50 лет. Но как отмечалось выше, такой подход к определению проектного срока службы является прогнозным. Существует множество неопределённостей, которые не обеспечивают уверенность в назначенных сроках службы, не только при реализации МРЗ, но и при ПЗ. Как уже отмечалось выше,

продолжительность сроков службы в 100 лет и 50 лет в зависимости от класса ответственности установлены в 2014 году, когда большинство ГТС уже находились на этапе эксплуатации.

Для повышения сейсмостойкости эксплуатируемых плотин, «имеющих дефицит сейсмостойкости» [3], рекомендуется уширение поперечного профиля плотины в ее нижней части; облегчение верхней части сооружений за счет применения оголовков минимальной массы, устройства верхней части сооружения в виде стенки, контрфорсной или рамной конструкции, выполнения полостей в пригребневой зоне сооружения и т.д.; применение пространственно работающих массивных гравитационных плотин. На этапе эксплуатации требуется проводить сейсмологический мониторинг на ГТС в соответствии с СП 358.1325800.2017 «Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах» [11].

В [3] предусматривается необходимость на напорных гидротехнических сооружениях I класса ответственности, расположенных в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на сооружениях II класса ответственности в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше по шкале MSK-64, проводить специальные наблюдений и испытания. Должны проводиться инженерно-сейсмометрические наблюдения за работой сооружений и береговых примыканий (сейсмометрический мониторинг); инженерно-сейсмологические наблюдения в зоне ложа водохранилища вблизи створа сооружений и на прилегающих территориях (сейсмологический мониторинг); определение динамических характеристик гидротехнических сооружений с составлением динамического паспорта. При необходимости должны быть организованы наблюдения за вибрацией сооружений, сейсмическими нагрузками на них, прочностью и водонепроницаемостью бетона, напряженным состоянием и температурным режимом конструкций, коррозией металла и бетона, состоянием сварных швов металлоконструкций, выделением газа на отдельных участках гидротехнических сооружений и др. При изменениях условий эксплуатации гидротехнических сооружений, способных привести к снижению их надежности, должны проводиться наблюдения по дополнительным программам.

В пунктах 7.1, 7.2, 7.3 [3] устанавливаются требования к реконструкции постоянных ГТС, в которых предусматривается проведение компенсирующих мер по снижению последствий старения сооружений, по учету изменения внешних воздействий, по повышению сейсмичности. А в пунктах 7.7 – 7.12 устанавливаются обязательные требования к консервации или ликвидации ГТС.

В разделе 8 [3] устанавливаются требования к обоснованию надежности и безопасности гидротехнических сооружений. В их составе требования к выполнению расчетов напряженно-деформированного состояния системы "сооружение-основание" на основе применения современных, главным образом численных, методов механики сплошной среды с учетом реальных свойств материалов и пород оснований. При этом устанавливаются две группы предельных состояний и требования, что учет сейсмических воздействий необходимо выполнять по СП 14.13330.2019, СП 38.13330.2018 и СП 358.1325800 [2, 10, 11].

В пункте 8.21 [3] установлено требование о необходимости предупреждения наступления предельных состояний на всех этапах строительства и эксплуатации, в том числе и в конце расчетного срока их службы. При этом допускается применение вероятностного анализа для обоснования принимаемых технических решений системы «сооружение-основание» (пункт 8.24), в первую очередь ГТС, которые относятся к основным сооружениям. В зависимости от возможного ущерба при разрушении и при соответствующем обосновании второстепенные сооружения допускается относить к основным сооружениям.

В [3] приводятся списки постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок и воздействий (Г.1) и особых нагрузок и воздействий (Г.2). В состав особых нагрузок и воздействий входят сейсмические воздействия, динамические воздействия от взрывов, гидродинамические и взвешивающие воздействия, обусловленные цунами. Землетрясения практически всегда связаны с последующей реализацией по их причине опасных природных и техногенных воздействий на территории объекта и рядом с ним [7].

Согласно действующей нормативной базе, должны регулярно проводиться оценки безопасности и сейсмостойкости по мере поступления новых данных изысканий по условиям размещения ГТС ГЭС; оценки надёжности эксплуатации водохранилища при нормальных и чрезвычайных гидрологических условиях; обучение персонала действиям в условиях чрезвычайных ситуаций; техническое обслуживание ГТС, всех конструкций и компонентов и т.д.

Краткий обзор актуальной (действующей в последние годы) нормативной базы показывает, что на настоящем этапе обязательных требований достаточно, но в результате рассмотрения положений, действующих нормативных правовых актов, можно сделать заключение, что нормативная база в основном направлена на проектирование и строительство новых гидроузлов. А для реализации требований по обеспечению сейсмостойкости для находящихся в эксплуатации ГТС, потребуются значительные усилия эксплуатирующих организаций, в том числе значительные финансовые и трудовые ресурсы квалифицированных специалистов.

О развитии нормативной базы для применения на эксплуатируемых гидротехнических сооружениях

Как уже отмечено выше, в зоне высокой сейсмической опасности расположено значительное число находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС. Поэтому необходимо осуществлять работы по оценкам сейсмостойкости, находящихся в эксплуатации комплексов ГТС ГЭС, на регулярной основе, чтобы не допустить потери их устойчивости при землетрясениях. И для этих целей необходимо обеспечить нормативными требованиями процесс управления безопасностью ГТС, находящихся в эксплуатации в зонах сейсмической опасности.

Эксплуатирующей организацией проводится деятельность по ослаблению повреждающих факторов на ГТС ГЭС. Выполняются на периодической основе разработки деклараций безопасности комплексов ГТС ГЭС и их экспертизы независимыми экспертными организациями. Однако на этих этапах практически сложно делать надёжные прогнозы о продолжительности их безопасной эксплуатации, особенно в зонах сейсмического риска.

Существенная роль должна отводиться проведению работ и оценок по подтверждению сейсмостойкости ГТС, определению и оптимизации мероприятий по их защите от внешних воздействий, которые ассоциируются с землетрясениями. Для управления безопасностью ГТС ГЭС актуальной является задача по минимизации всех рисков основываясь на системном анализе с использованием вероятностных и детерминистических методов, результатах измерений, расчетных исследований. При этом необходимо делать заключения о сейсмостойкости ГТС ГЭС и определять предельные сроки службы комплекса ГТС ГЭС, особенно при наличии угрозы возможного землетрясения 7 и более баллов.

Необходимо оценить деятельность по обеспечению непрерывности безопасной эксплуатации ГТС ГЭС, уже находящихся в эксплуатации, на длительную перспективу, а также являются ли достаточными положения и требования, содержащиеся в действующих

нормативных правовых актах [1, 2, 3] по управлению последствиями землетрясений на ГТС и территориях рядом с ними.

Заключение

До тех пор, пока может быть гарантировано надлежащее решение вопросов безопасности на находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС сооружения могут противостоять нагрузкам от землетрясения.

Обеспечение сейсмостойкости, находящихся в эксплуатации ГТС ГЭС, предполагает проведение комплекса работ. При этом надежность изысканий, исследований, расчетов и испытаний должна контролироваться в отношении всех работ, входящих в состав комплекса работ.

Как уже отмечено выше в настоящей статье, для обеспечения сейсмостойкости ГТС, находящихся на этапе эксплуатации, получить надёжные прогнозы их сейсмостойкости практически нереально. Отсутствует надёжная информация по наличию остаточного ресурса на обеспечение устойчивости ГТС при землетрясениях.

Поэтому возникает вопрос о том, как долго можно продолжать безопасно эксплуатировать комплексы ГТС ГЭС, находящиеся длительное время в эксплуатации, как можно управлять сроком безопасной эксплуатации ГТС ГЭС, если существует опасность реализации землетрясения.

Поэтому требуется формирование системного подхода по управлению безопасностью, находящихся в длительной эксплуатации комплексов ГТС ГЭС, с целью противостоять воздействиям от землетрясений и связанных с ними ассоциаций внешних воздействий природного и техногенного характера.

В работах [5, 6] для проектов гидросооружений принято использовать комплексную концепцию интегральной безопасности. Для ГТС Российской Федерации также целесообразно рассмотреть подход зарубежных специалистов и разработать нормативный правовой акт, содержащий концепцию интегральной безопасности ГТС, находящихся в эксплуатации при землетрясениях, с комплектом методических рекомендаций. Использование этого нормативного правового акта позволит управлять безопасностью комплекса ГТС, находящихся в длительной эксплуатации, при реализации землетрясения.

Список литературы

1. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
2. СП 14.13339.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах». Москва: Минстрой РФ; 2018.
3. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. СНиП 33-01-2003». Москва: Стандартинформ; 2020.
4. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606.
5. Wieland M. Life-span of storage dams, *Water Power and Dam Construction*, 2010.
6. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems, *Water Power and Dam Construction*, 2009.
7. Калиберда И.В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения. Безопасность объектов использования атомной энергии. Москва: Логос. 2002. 544 с.
8. Калиберда И.В. Обеспечение сейсмостойкости объектов энергетики. *Безопасность труда в промышленности*. 2011. № 5. С. 26–35.

9. СП 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений». Москва: Росстандарт; 2018.
10. СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». Москва: Росстандарт; 2018.
11. СП 358.1325800.2017 «Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах». Москва: Стандартинформ; 2018.

References

1. Federal'nyj zakon ot 30 dekabrya 2009 g. No. 384-FZ «Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij». [In Russian]
2. SP 14.13339.2018 «СНиП II-7-81* Stroitel'stvo v sejsmicheskikh rajonah». Moscow: Minstroy RF; 2018. [In Russian]
3. SP 58.13330.2019. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya. Osnovnye polozheniya. SNiP 33-01-2003». Moscow: Standartinform; 2020. [In Russian]
4. Sornell C.A. Engineering seismic risk analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 1968, vol. 58, no. 5, pp. 1583–1606.
5. Wieland M. Life-span of storage dams, Water Power and Dam Construction, 2010.
6. Wieland M., Mueller R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems, Water Power and Dam Construction, 2009.
7. Kaliberda I.V. Otsenka parametrov vneshnih vozdeystvij prirodnoho i tekhnogennoho proiskhozhdeniya. Bezopasnost' ob"ektov ispol'zovaniya atomnoj energii. Moscow: Logos. 2002. 544 p. [In Russian]
8. Kaliberda I.V. Obespechenie sejsmostojkosti ob"ektov energetiki. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2011, no. 5, pp. 26–35. [In Russian]
9. SP 23.13330.2018 «СНиП 2.02.02-85 Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». Moscow: Rosstandart; 2018. [In Russian]
10. SP 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (volnovye, ledovye i ot sudov)». Moscow: Rosstandart; 2018. [In Russian]
11. SP 358.1325800.2017 «Sooruzheniya gidrotekhnicheskie. Pravila proektirovaniya i stroitel'stva v sejsmicheskikh rajonah». Moscow: Standartinform; 2018. [In Russian]

Информация об авторах

Калиберда Инна Васильевна, доктор технических наук, научный руководитель. ФБУ «Научно-технический центр Энергобезопасность». Москва, Российская Федерация
e-mail: Kaliberdajob@mail.ru

Kaliberda Inna V., Dr. Sci. (Engineering), Scientific Leader. Federal Budgetary Enterprise “Scientific and Engineering Centre for Energy Safety”. Moscow, Russian Federation

Пименов Владимир Иванович, кандидат технических наук, начальник отдела. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Москва, Российская Федерация
e-mail: V.Pimenov@gosnadzor.gov.ru

Pimenov Vladimir I., Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Moscow, Russian Federation