

*На правах рукописи*



**Альдреби Зиад Ахмад**

**ПОВЫШЕНИЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ  
АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ  
СИРИИ С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕНИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ  
ВОЕННЫХ ДЕЙСТВИЙ**

Специальность: 2.1.1. Строительные конструкции,  
здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Белаш Татьяна Александровна**

Официальные оппоненты: **Митасов Валерий Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)», кафедра железобетонных  
конструкций, профессор;

**Долгая Анжелика Александровна**  
кандидат технических наук, АО  
«Трансмост», г. Санкт-Петербург, сектор  
разработки программных средств, инженер-  
проектировщик I категории;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Грозненский государственный  
нефтяной технический университет имени  
академика М. Д. Миллионщикова».**

Защита состоится «26» мая 2022 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./факс: (812) 316-58-73; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/aldrabi-ziad-ahmad>

Автореферат разослан «14» апреля 2022 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



В. М. Попов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Территория Сирии проходит рядом с Северо-Анатолийским и Левантским разломами, являющимися причинами многих разрушительных землетрясений в этом районе, которые приводят к гибели тысяч людей и громадному материальному ущербу. При этом находящиеся в этом регионе архитектурные памятники, имеющие всемирное значение, могут безвозвратно и навсегда исчезнуть. Ситуация усугубляется в связи с начавшимися в 2011 г. военными действиями, дополняющими разрушительные природные воздействия. Поэтому изучаемые в диссертации вопросы обеспечения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии с учетом повреждений, полученных в результате военных действий, приобретают весьма актуальное значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам сейсмостойкого строительства посвящена обширная литература, представленная в трудах таких известных ученых как Айзенберга Я.М., Быховского В.А., Гольденבלата И.И., Жунусова Т.М., Завриева К.С., Кабанцева О.В., Карапетяна Б.К., Карцевадзе Г.Н., Корчинского И.Л., Махатадзе Л.Н., Медведева С.В., Назарова А.Г., Напетравидзе Ш.Г., Николаенко Н.А., Тонких Г.П., Рассказовского С.В., Сеницына А.П., Уздина А.М., Чураяна А.Л., а также зарубежных специалистов Борджерса Дж., Джекобсена Л., Ньюмарка Н. и других.

Большой круг исследований по методологии восстановления каменных зданий представлены в работах Айзенберга Я.М., Корчинского И.Л., Мартемьянова А.И. и других.

Вопросами сейсмоусиления строительных конструкций памятников архитектуры, построенных из каменной кладки, занимались Алексеенко В.Н., Жиленко О.Б., Мелкумян М.Г., Напетваридзе Т.Ш., Шадмонова З.С. и другие.

В известных исследованиях основное внимание уделено конструктивным решениям повышения сейсмостойкости зданий и сооружений после прошедших землетрясений или, при изменении сейсмичности площадки строительства в сторону ее увеличения. При этом вопросами о значении и учёте класса сейсмостойкости зданий и сооружений в известных исследованиях изучены недостаточно, во многих случаях без оценки важной роли социальных и экономических рисков, вызванных ущербами после сильных землетрясений. Необходимость изучения влияния этих факторов имеет особое значение для культовых зданий мусульманского зодчества, выполненных из каменных конструкций и сосредоточенных на всей территории Сирии.

Эти объекты посещаются значительным количеством верующих людей. В настоящее время многие из этих зданий имеют серьёзные повреждения, вызванные не только последствиями землетрясений, но и военными действиями. В случае возникновения повторных сейсмических воздействий, может возникнуть ситуация полного разрушения памятников архитектуры мусульманского зодчества с гибелью находящихся в них людей.

На основании вышеизложенного были сформулированы цель и задачи исследования.

**Целью исследования** является обоснование целесообразности повышения сейсмостойкости архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества на территории Сирии с учётом их повреждений, полученных в ходе военных действий, а также разработка рекомендаций по усилению поврежденных зданий.

**Задачи исследования:**

1. Анализ состояния архитектурных памятников на территории Сирии с учетом сейсмической активности и боевых действий.

2. Реальная оценка сейсмичности сейсмоопасных регионов на территории Сирии.

3. Выявление характерных повреждений строительных конструкций архитектурных памятников Сирии на примере культовых зданий мусульманского зодчества и обобщение информации по их техническому состоянию.

4. Разработка методики сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества с учётом установления требуемого класса их сейсмостойкости.

5. Выполнить расчетно-теоретические исследования сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества до и после повреждений, полученных в ходе военных действий с использованием численных методов моделирования.

6. Разработка рекомендаций по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества с полученными в ходе военных действий повреждениями.

**Объектом исследования** являются архитектурные памятники Сирии, рассмотренные на примере культовых зданий мусульманского зодчества.

**Предметом исследования** является оценка сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества на территории Сирии с учетом повреждений, полученных в ходе военных действий.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Получены новые уточняющие сведения по сейсмичности территории Сирии для обоснования сейсмостойкости существующих культовых зданий мусульманского зодчества.

2. Предложена методика сейсмоусиления памятников архитектуры Сирии на примере зданий мусульманского зодчества, получивших повреждения в ходе военных действий основанная на реальной оценке класса их сейсмостойкости с учётом экономических и социальных рисков.

3. С помощью численного моделирования выполнен расчетно-теоретический анализ сейсмостойкости зданий мусульманского зодчества до и после повреждений в ходе военных действий на примере культового здания Великой мечети в г. Алеппо при сейсмических воздействиях различного частотного состава и интенсивности.

4. Установлено, что культовые здания мусульманского зодчества с полученными в ходе военных действий повреждениями, в случае возникновения сейсмических воздействий различного частотного состава и интенсивности 8-9 баллов, будут окончательно разрушены.

5. Предложены и исследованы различные технические решения по повышению сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества, получивших повреждения в ходе военных действий, обеспечивающие их прочность и устойчивость к сейсмическим воздействиям.

**Теоретическая значимость диссертационной работы** заключается в разработанной методологической основе сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества, устанавливающей необходимость определения класса сейсмостойкости с учетом социальных и экономических рисков.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в обосновании эффективных конструктивных мероприятий по сейсмоусилению культовых зданий мусульманского зодчества с учетом полученных повреждений различного характера. Рекомендации по сейсмоусилению, полученные в данной диссертации, могут быть использованы, в других памятниках арабского зодчества.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Основываются на применении известных теоретических подходов, базирующихся на принципах анализа и синтеза. Решение поставленных задач достигалось путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов. При этом используются методы, строительной механики, а также теоретические данные, полученные российскими и зарубежными учеными в области изучения усиления каменных конструкций.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно п.5: «Разработка и совершенствование методов и систем качества строительных конструкций зданий и сооружений в период их строительства, эксплуатации, усиления и восстановления»; а также п.8: «Методы и техника оценки и диагностики технического состояния, усиление и восстановление конструкций и элементов эксплуатируемых зданий и сооружений, прогрессивные формы обслуживания зданий, сооружений и систем их жизнеобеспечения».

**Достоверность результатов** обеспечивается применением общепринятых и обоснованных методов и методик, сопоставлением результатов с данными, полученными другими авторами, а также использованием надежных и апробированных вычислительных программ.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчета и дополнения информации о сейсмичности территории Сирии при обосновании сейсмостойкости зданий мусульманского зодчества.

2. Методика сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества основанная на реальной оценке класса их сейсмостойкости с учетом

экономических и социальных рисков, позволяющая обосновано проводить конструктивные мероприятия по повышению сейсмостойкости этих зданий.

3. Результаты расчетно-теоретического анализа сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества до и после повреждений, на примере Великой мечети в г. Алеппо, в случае сейсмических воздействий различного частотного состава и интенсивности. При этом установлено, что при сейсмических воздействиях различного частотного состава и интенсивности от 8-9 баллов оставшиеся конструктивные элементы здания могут быть полностью разрушены.

4. Рекомендации по выбору технических решений, направленных на повышение сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества получивших повреждения во время военных действий с использованием традиционных и нетрадиционных подходов.

#### **Апробация результатов диссертационного исследования**

Основные положения диссертационной работы докладывались на научно-практических конференциях:

1. Научно-практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием (1-2 декабря 2016, г. Москва), АО «НИЦ «Строительство».

2. Теория и практика расчёта зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Международная научно-практическая конференция 21.06.2017 г., г. Москва, НИУ МГСУ.

3. Конференция «Проблемы достижения в области строительного инжиниринга» 17 апреля 2019г., г. Санкт-Петербург, ПГУПС Императора Александра I.

4. Национальная конференция «Перспективы будущего в образовательном процессе – 2019» 18 апреля 2019 г., г. Санкт-Петербург, ПГУПС Императора Александра I.

5. XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1- 6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС (Российская Ассоциация по Сейсмостойкому Строительству и защите от природных и техногенных воздействий).

6. Научный семинар, посвященный 110-летию доктора технических наук, профессора Олега Александровича Савинова, г. Санкт-Петербург, 3-6 февраля 2020г.

7. Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «Far East Con 2020» 5-8 октября 2020г., г. Владивосток, ФГАОУ ВО ДВФУ (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный Федеральный Университет»).

#### **Публикации**

Основные положения диссертационной работы, опубликованы в 16 научных статьях, из них 9 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

## Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений.

Полный объем диссертационного исследования - 204 страницы, в том числе: 130 рисунков, 40 таблиц, библиографический список использованной литературы из 120 наименований, 4 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* приведена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, указана информация об апробации результатов работы, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая её значимость.

В *первой главе* выполнена оценка сейсмической обстановки на территории Сирии на протяжении длительного периода времени начиная с 2500 года до нашей эры по настоящее время. Выполнен обзор архитектуры памятников различных периодов. Дана оценка состояния объектов арабского зодчества после сильных землетрясений, и военных действий, которые происходили на территории Сирии в последнее десятилетие.

Сейсмичность территории Сирии обусловлена наличием Северо-Анатолического и Левантского разломов, которые являются причиной землетрясений различной интенсивности и частотного состава.

Выполненный обзор памятников архитектуры, в Сирии показал, что они принадлежат к различным историческим эпохам, например, Триумфальная арка (рисунок 1-а) и храм Бела в Пальмире (рисунок 1-б) принадлежат к римской архитектуре, замок Крак де Шевалье в провинции Хомс (рисунок 1-в) принадлежит к средневековой фортификационной архитектуре. Великая мечеть в г. Алеппо (рисунок 1-г), Мечеть аль-Адиллия в г. Алеппо (рисунок 1-д), Великая мечеть в г. Маарат аль-Нуман (рисунок 1-е), мечеть Халида ибн аль-Валида в г. Хомс (рисунок 1-ж), мечеть Омара в г. Босра (рисунок 1-и) относятся к мусульманской архитектуре.

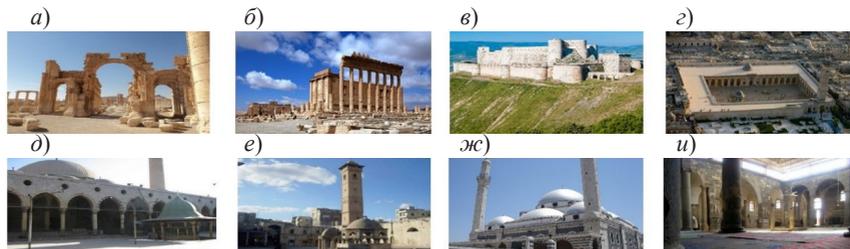


Рисунок 1 – Памятники архитектуры в сирии:

- а – Триумфальная арка в Пальмире; б – Храма Бела в Пальмире;  
 в – Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс; г – Великая Мечеть в г.Алеппо;  
 д – Мечеть аль-Адиллия в г. Алеппо; е – Великая мечеть в г. Маарат аль-Нуман;  
 ж – мечеть Халида ибн аль-Валида в г. Хомс; и – Мечеть Омара в г. Босра

Анализ памятников архитектуры показал, что они отличаются большим многообразием среди них наиболее многочисленную группу составляют памятники архитектуры мусульманского зодчества. Эти памятники занимают почти 52 % от общего количества. Основными архитектурными особенностями этих памятников являются наличием внутреннего двора, окруженного прямоугольным зданием (рисунок 1–з), с галереями с трех сторон, отличающимися большой протяженностью, а с южной стороны, это, как правило, закрытые помещения – места для совершения молитвы. Кроме того, основной отличительной особенностью этих памятников является наличие минарета, который считается доминантой в архитектурном облике культовых зданий. Эти здания посещают большое количество людей во время религиозных обрядов.

В реферируемой главе представлен обзор состояния памятников после сильных землетрясений и после военных действий, начавшихся в 2011 году. Исследованы повреждения, которые были получены памятниками в результате прошлых землетрясений, некоторые примеры приведены на рисунке 2.

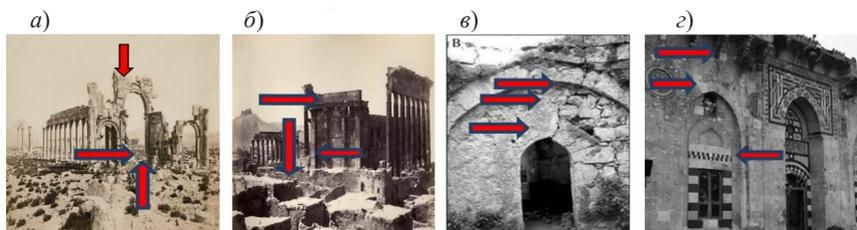


Рисунок 2 – Примеры некоторых памятников архитектуры в Сирии, поврежденные в результате прошлых землетрясений: *а* – Триумфальная арка в Пальмире; *б* – Храма Бела в Пальмире; *в* – Замок Крак де Шевалье в провинции Хомс; *г* – Великая Мечеть в г.Алеппо

На эти повреждения наложились ещё и повреждения от военных действий, начавшихся в 2011 году (рисунок 3, *а–и*). Так, в триумфальной арке повреждения граничили с полным её разрушением, храм Бела в Пальмире был также почти полностью разрушен. Замок Крак де Шевалье получил множество повреждений в виде трещин, выколов и выпадения камней. Великая мечеть в г. Алеппо получила повреждения и разрушения строительных конструкций в виде выпадения камней, трещин, частичного разрушения некоторых стен, повреждения колонн и полного разрушения минарета. Другим примером разрушения культовых зданий явилась Мечеть аль-Адиллия в г. Алеппо, которая тоже получила множество повреждений строительных конструкций в ней были повреждены колонны, галереи, купол фонтана и другие конструкции. Великая мечеть в г. Маарат аль-Нуман получила повреждения строительных конструкций на корпусе минарета и на его крыше, которая была частично разрушена. Серьёзные повреждения имели место в мечети Халида ибн аль-Валида в г Хомсе, повреждения были на корпусе минарета, на куполах

и на стенах. Мечеть Омара в г. Босра в провинции Даръа имела многочисленные повреждения на крыше, в стене образовались пробоины.

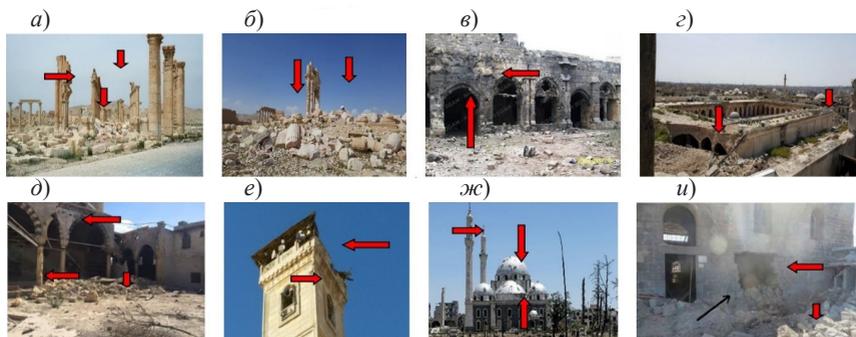


Рисунок 3 – Памятники архитектуры в Сирии поврежденные в результате военных действий: *а* – Триумфальная арка в Пальмире; *б* – Храма Бела в Пальмире; *в* – Фасад рыцарского зала в замке Крак де Шевалье в провинции Хомс; *г* – Великая Мечеть в г.Алеппо; *д* – Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо; *е* – Великая мечеть в г. Маарат аль-Нуман; *ж*– мечеть Халида ибн аль-Валида в г. Хомс; *и* – Мечеть Омара в г. Босра

Оценка повреждений, полученных различными памятниками архитектуры свидетельствует, что наибольшую степень повреждений получили в основном культовые объекты мусульманского зодчества. Эти объекты являются наиболее важными и значимыми для культурного и религиозного наследия Сирии. Кроме того, учитывая, что землетрясения носят случайный и непредсказуемый характер, может возникнуть ситуация, когда в момент землетрясения в мечетях будет находиться большое количество верующих людей, жизни которых будет угрожать опасность из-за обрушения поврежденных конструкций. В этой связи, вопрос обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций культовых зданий мусульманского зодчества становится одним из наиболее важных и актуальных не только для выполнения и организации восстановительных работ, но и для обеспечения безопасности жизнедеятельности людей на этих территориях.

Эти обстоятельства явились причиной выбора темы диссертации, ее цели и задач исследования.

Во *второй главе* выполнено уточнение сведений по сейсмичности территории Сирии для обоснования сейсмостойкости существующих культовых зданий мусульманского зодчества, так как существующая ранее информация является разрозненной, неполной и не позволяет полноценно произвести необходимые исследования и расчеты. В результате изучения информации о пиковых ускорениях грунта (PGA) из различных источников и данных об исторических землетрясениях, впервые была вычислена и получена новая информация о сейсмичности территории Сирии  $I_{(100)}$ ,  $I_{(500)}$ ,  $I_{(1000)}$ ,  $I_{(2000)}$  в баллах по шкале сейсмической

интенсивности ШСИ-17 (таблица 1), при повторяемости землетрясений  $T_{eq} = 100$ ,  $T_{eq} = 500$ ,  $T_{eq} = 1000$ ,  $T_{eq} = 2000$  лет соответственно по аналогии с сейсмическим районированием в Российской Федерации. Эта информация дополняет информацию о сейсмичности Сирии и может быть рекомендована сирийским специалистам в области сейсмостойкого строительства.

Таблица 1 – уточнённая и дополненная информации о сейсмичности территории Сирии

Город	Повторяемость землетрясений $T_{eq} = 100$ лет			Повторяемость землетрясений $T_{eq} = 500$ лет			Повторяемость землетрясений $T_{eq} = 1000$ лет			Повторяемость землетрясений $T_{eq} = 2000$ лет		
	$I_{(100)}$ , балл	$I_{(100)}$ , полубалл	(PGA), (g)	$I_{(500)}$ , балл	$I_{(500)}$ , полубалл	(PGA), (g)	$I_{(1000)}$ , балл	$I_{(1000)}$ , полубалл	(PGA), (g)	$I_{(2000)}$ , балл	$I_{(2000)}$ , полубалл	(PGA), (g)
Алеппо	VII	6,11	0,051	VII	6,13	0,052	VIII	7,52	0,189	IX	8,53	0,469
Дарья	VIII	7,4	0,101	VIII	7,6	0,156	IX	8,5	0,423	X	9,5	1,074

Для расчета были дополнительно использованы таблицы Б.1-Б.2 и формулы (1) и (2) из ШСИ-17:

$$I = 2,50 \lg(\text{PGA}) + 1,89 \pm 0,6, \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность землетрясения в баллах по ШСИ-17; PGA – пиковое ускорение грунта, см/с<sup>2</sup>.

Зная расчетный балл можно с помощью формулы (1) получить формулу (2) для расчёта пиковых ускорений грунта (PGA):

$$\text{PGA} = 10^{\frac{I - 1,89 \pm 0,6}{2,50}}. \quad (2)$$

Далее с учётом дополненной информации о сейсмичности территории Сирии была выполнена паспортизация пяти наиболее типичных и значимых культовых зданий мусульманского зодчества в Сирийской Арабской Республике часть которых входит в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, а именно Великая мечеть в г. Алеппо (рисунок 1–з) и (рисунок 4–а, з), Мечеть аль-Адилия в г. Алеппо (рисунок 1–д), Великая мечеть в г. Маарат аль-Нуман (рисунок 1–е), Мечеть Халида ибн аль-Валида в г. Хомс (рисунок 1–ж), Мечеть Омара в г. Босра в провинции Дарья (рисунок 1–и).

Информация о них была сведена в анкетные карточки объектов куда заносились описания их состояния, описания повреждений и степени уязвимости от прошлых землетрясений и военных действий, которые как оказалось варьируются от умеренных повреждений –  $d_2$  до значительных или тяжёлых

повреждений –  $d_3$ , по европейской макросейсмической шкале EMS-98. Даны предварительные рекомендации по их сейсмоусилению и (или) восстановлению разрушенных частей.

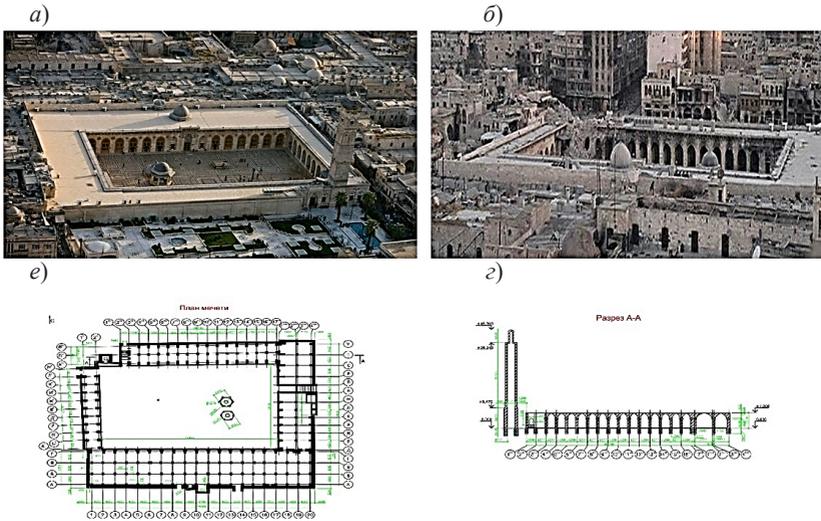


Рисунок 4 – Великая мечеть г. Алеппо, Сирия:

*а* – Великая мечеть до повреждений; *б* – Великая мечеть после повреждений;  
*в* – План Великой мечети; *г* – Разрез А-А Великой мечети

В результате выполненной паспортизации установлено что наибольший ущерб был получен в Великой мечети в г. Алеппо, которая как было сказано выше, входит в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Поэтому дальнейшее исследование культовых памятников мусульманского зодчества проводилось на примере именно этой мечети как наиболее типичной и значимой для мусульманского зодчества в Сирийской Арабской Республике.

В *третьей главе* разработана методика расчета необходимого сейсмоусиления культового здания мусульманского зодчества, основанная на определении класса сейсмостойкости с учётом возможных экономических и социальных ущербов, позволяющая оценить экономические и социальные риски. Эта методика была реализована применительно к Великой мечети в г. Алеппо в Сирии (рисунок 1–г).

Территория г. Алеппо является сейсмически активной с ситуационной сейсмичностью, приведенной в таблице 1. Мечеть представляет собой одноэтажное здание, имеющее размеры в плане  $105 \times 78$  м, с множеством мощных колонн высотой около 6 метров, образующих галереи вокруг внутреннего двора мечети. На северо-западной стороне расположен квадратный минарет размерами около  $4,8 \times 4,8$  м., высотой 45 метров.

Для оценки сейсмической опасности рассматриваемого культового комплекса важно оценить возможное количество людей в комплексе во время землетрясения. Для выполнения расчёта была изучена статистика посещения мечети людьми в течение одного дня, недели, месяца, года, по пятницам, и по религиозным праздникам. Мечеть бывает заполненной людьми полностью не более 10 % времени и маловероятно, что в этот промежуток произойдет самое сильное землетрясение. Для оценки необходимого коэффициента сочетаний были рассмотрены равновероятные пары: число посетителей  $N$ , сила землетрясения  $I$ . Вероятность появления такой пары равна произведению двух вероятностей: вероятности  $P_{hum}$  наличия людей в количестве более, чем  $n$  и вероятности  $P_{eq}$  возникновения землетрясения силой более чем  $I$ . Эта вероятность ограничивается допустимой вероятностью  $[P]$  (формула 3). Величина  $[P]$  принята в работе равной  $\frac{1}{2000}$ , что соответствует наиболее распространенным решениям при назначении допустимых рисков.

$$P_{eq} \cdot P_{hum} = [P]. \quad (3)$$

Формула (3) определяет множество равновероятных пар (число людей, сила землетрясения), из которых следует выбрать наиболее опасную пару.

В связи с этим необходимо было:

1. Задать функцию распределения интенсивности землетрясений  $P_{eq}$ ;
2. Задать функцию распределения для количества людей в мечети  $P_{hum}$ ;
3. Определить критерий опасности рассматриваемой пары.

Порядок решения поставленных задач заключается в следующем.

*Первая задача* неоднократно рассматривалась в литературе. По ситуационной сейсмичности и заданной повторяемости воздействия месторасположения мечети (таблица 1), которые были найдены с помощью, уточнённой и дополненной ранее информации о сейсмичности территории Сирии. Выполнен расчет пиковых ускорений  $A$ , вероятности возникновения землетрясения в течении года  $P_{eq}$  и расчетной балльности  $I$  при средней повторяемости расчетного землетрясения  $T_{eq}$  равным 100, 500, 1000 и 2000 лет. Преобладающий период воздействия, необходимый для вычисления  $P_{eq}$ , был принят равным  $T = 0,4$  сек., величина  $T$  соответствует основному тону колебаний мечети без повреждений. Расчет был выполнен по программе определения пиковых ускорений сейсмического воздействия, разработанной под руководством профессора Уздина А.М.

*Вторая задача* включала задание ф.р. числа людей в помещении мечети. Для этого было предложено использовать  $\beta$  – распределение. Функция плотности вероятности  $\beta$  – распределения, принята в виде:

$$p(x) = \frac{x^{\nu} \cdot (1-x)^{\mu}}{B(\nu, \mu)}, \quad (4)$$

где  $\mu$  и  $\nu$  – параметры распределения;  $B(\nu, \mu)$  – это  $\beta$  – функция.

Функция задана на отрезке от 0 до 1, где 0 это полное отсутствие людей, а 1-полная заполненность мечети. Вид функции показан на рисунке 5. Параметры распределения могут быть вычислены по известным значениям математического ожидания  $\bar{D}$  и дисперсии  $\sigma^2$  анализируемой случайной величиной.

Опираясь на собранную ранее статистику, которая учитывает количество людей  $N$  посещающих мечеть были найдены математическое ожидание числа людей  $\bar{D} = 1088$  чел., и среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 775$ .

*Третьей задачей* являлась задание критерия опасности пары (число людей, сила воздействия). В качестве такого критерия в работе принята стоимость затрат, вызванных возможными землетрясениями. Такой подход к выбору опасной пары рассматривается впервые.

Расчет затрат  $E$  при сейсмоусилении здания осуществляется по формуле 5:

$$E = -I_{inv} - f \cdot R, \quad (5)$$

где  $I_{inv}$  –затраты на сейсмоусиление здания;  $f$  – коэффициент который учитывает суммирование годовых затрат по годам службы здания  $n$ ;  $R$  – сейсмический риск, обусловленные экономическими  $D_{ec}$  и социальными  $D_{soc}$  годовыми потерями от сейсмических воздействий

Значение годовых экономических потерь  $D_{ec}$  оценено согласно известным литературным данным об экономическом ущербе для каркасных и кирпичных зданий от землетрясений в России. Эти данные были адаптированы для Сирии с учетом фактической сейсмологической обстановки в месте расположения мечети.

Для расчета социального риска  $D_{soc}$  использованы литературные данные о человеческих потерях при стихийных бедствиях, с оценкой страховки человеческой жизни в 1.6 млн. руб.

На основе выполненных расчетов получены матрицы экономического и социального рисков, и по формуле 6 оценен сейсмический риск, входящий в (5).

$$R = \sum_{I=5}^{I_{max}} (D_{ec}(K_s, I) + \chi D_{soc}(K_s, I)) L(I), \quad (6)$$

где  $D_{ec}(K_s, I)$  – экономический ущерб;  $D_{soc}$  – социальный ущерб;  $\chi$  – коэффициент который учитывает отличие в количестве людей в здании от среднестатистических данных, использованных в России,  $L(I)$  – сотрясаемость территории землетрясениями силой  $I$  баллов.

Величина  $\chi$  вычислена с учётом полученной ф.п.р. для заполненности мечети, при этом рассматривались различные пары «сила землетрясения – заполненность мечети» и для каждой пары было определено своё значение  $\chi$ .

Численная оптимизация функции затрат ( $E$ ) дала результат ( $N, K_s$ ) где  $N = 2500$  человек – число людей,  $K_s = 8,6$  – класс сейсмостойкости. По существу, была выбрана пара, в которой выбранному риску соответствует сила 8,6 балла с соответствующим заполнением мечети людьми.

Выполнен расчет требуемого класса сейсмостойкости для здания Великой мечети в г. Алеппо. Установлено что класс сейсмостойкости на который необходимо усилить здание равен  $K_s = 8,6$  баллов (рисунок 5).

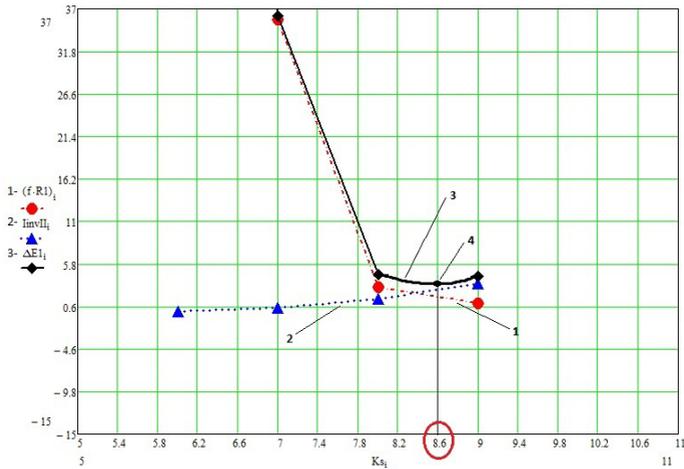


Рисунок 5 – Графики зависимости рисков и затрат на сейсмоусиления здания с учетом социальных потерь: график 1 –  $f \cdot R(K_s)$  показывает риски от землетрясения для здания, в зависимости от класса её сейсмостойкости; график 2 –  $I_{inv}(K_s)$  показывает затраты на усиление здания с классом сейсмостойкости  $K_s = 6, 7, 8$  и  $9$ ; график 3 –  $\Delta E(K_s)$  показывает суммарные затраты на сейсмоусиление здания; точка 4 – показывает оптимальное значение класса сейсмостойкости здания, соответствующее  $K_s = 8,6$  баллов

Установленный класс сейсмостойкости был использован в последующих главах при рассмотрении вопросов повышения сейсмостойкости культового здания мусульманского зодчества.

В *четвертой главе* представлены результаты расчётно-теоретического анализа сейсмостойкости культовых зданий мусульманского зодчества на примере Великой мечети в г. Алеппо до и после военных действий и предложен комплекс конструктивных мероприятий по повышению их сейсмостойкости с учётом методологических рекомендаций, разработанных в главе 3.

На первом этапе исследования рассматривались две расчетные модели, соответствующие конструктивному решению культового здания мусульманского зодчества на примере Великой мечети в г. Алеппо.

Расчет выполнялся с помощью программного комплекса «ЛИРА-САПР 2016» с использованием метода конечных элементов. Конструктивные элементы здания в расчётных моделях были представлены в виде пластин.

В расчётном исследовании первая модель соответствует состоянию мечети до разрушений. Вторая модель соответствует состоянию после

разрушения в результате военных действий, её состояние принято по результатам визуального обследования. Расчетные модели показаны на рисунке 6.

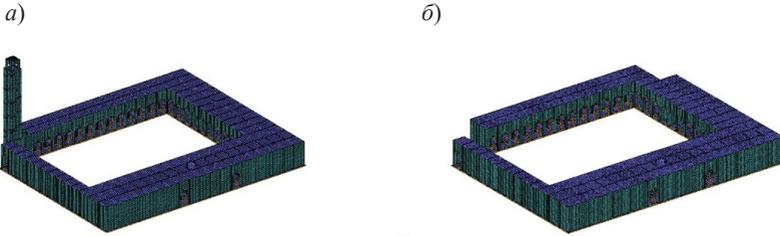


Рисунок 6 – Расчетные модели Великой мечети в г. Алеппо:  
а – №1 до разрушений; б– №2 после разрушений

При выполнении численного исследования рассматривались сейсмические воздействия интенсивностью от 7 до 8,6 баллов с учётом установленного класса сейсмостойкости при различном частотном диапазоне. Ввиду того, что реальные свойства каменной кладки оценить было сложно, то было принято решение, её свойства менять путём изменения модуля упругости кладки.

Для расчётной модели №1 значения были приняты  $\alpha = 1000$ ,  $R = 6$  МПа,  $\kappa = 2$ ,  $E_0 = \alpha \cdot \kappa \cdot R = 1000 \cdot 2 \cdot 6 = 12000$  МПа, что соответствует её положительным свойствам и высоким прочностным параметрам, а для расчётной модели № 2 значение модуля упругости кладки принималось  $E_0 = 750 \cdot 2 \cdot 5,5 = 8250$  МПа, что соответствует её повреждениям. Повреждения в кладке учитывались путём понижения значения модуля упругости до значений, существенно снижающих прочностные характеристики кладки. Некоторые результаты расчёта представлены на рисунке 7.

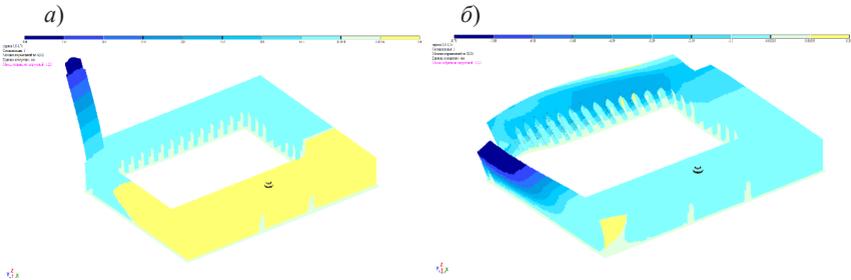


Рисунок 7 – Изменение перемещений в здании Великой мечети в г. Алеппо:  
а – по X до разрушений здания для 8,6 баллов;  
б – по X после разрушений здания для 8,6 баллов

Анализ выполненных исследований показал, что при сейсмических воздействиях от 7 баллов и ниже, независимо от частотного их состава, в культовом здании мусульманского зодчества с полученными повреждениями

в ходе военных действий, в случае возникновения сейсмических воздействий они не вызовут дальнейших разрушений, чего нельзя сказать о воздействиях, соответствующих 8,6 баллов и выше при различном частотном спектре воздействий. Картина повреждения не только изменится в сторону её ухудшения, но может возникнуть ситуация окончательного разрушения памятников архитектуры арабского зодчества, что свидетельствует о необходимости проведения комплекса мер по её усилению.

Для восстановления сейсмостойкости рассматриваемого объекта использованы традиционные и нетрадиционные подходы повышения сейсмостойкости. Известно, что традиционные конструктивные решения направлены на повышение несущей способности строительных конструкций и широко применяются в практике сейсмостойкого строительства.

На первом этапе предлагается традиционный способ для сейсмоусиления с помощью современных инновационных материалов, а именно армирование спиральными стержнями из нержавеющей стали и стержнями из углеполимера для сохранения аутентичности и внешнего облика Великой мечети. Спиральные стержни из нержавеющей стали и стержни из углеполимера имеют малый диаметр, поэтому при их использовании требуется устройство канавок небольших размеров и отверстий, что в свою очередь почти не влияет на прочность усиливаемой конструкции и не требует большого расхода раствора для швов. Технология установки стержней достаточно известна в Европе.

Иллюстрация процесса установки стержней показана на рисунках 8 и 9.

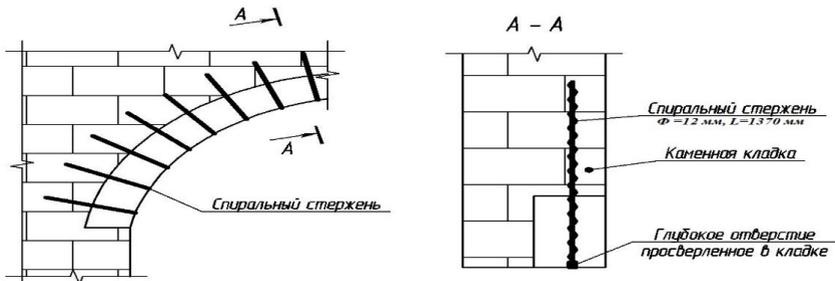


Рисунок 8 – Укрепление и анкерка арочных перемычек и арок Великой мечети г. Алеппо при наличии трещин с помощью спиральных стержней из нержавеющей стали

Усиление производится с учетом рекомендуемого класса сейсмостойкости на 8,6 баллов, который был определен в третьей главе.

Это предлагаемое усиление было обосновано расчетом, который представлен в диссертации. Суть его заключается в определении зон строительных конструкций, в которых напряжения превышают допустимые значения.

Недостаток несущей способности кладки в каждом элементе компенсируется армированием спиральными стержнями из нержавеющей стали и стержнями из углеполимера. Для определения наличия избыточных напряжений использовалась формула (7):

$$N \leq m_g \cdot \varphi_1 \cdot R \cdot A_c \cdot \omega, \quad (7)$$

где  $R$  – расчетное сопротивление кладки сжатию;  $A_c$  – площадь сжатой части сечения определяется по формуле 14 СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции»;  $\varphi_1$  – коэффициент продольного изгиба, определяемый по формуле 15 СП 15.13330.2012;  $m_g$  – коэффициент, учитывающий влияние длительной нагрузки;  $\omega$  – коэффициент увеличения расчетного сопротивления при внецентренном сжатии, принимаемый по таблице 20 СП 15.13330.2012. Предлагаемые варианты усиления показаны на рисунках 8 и 9.

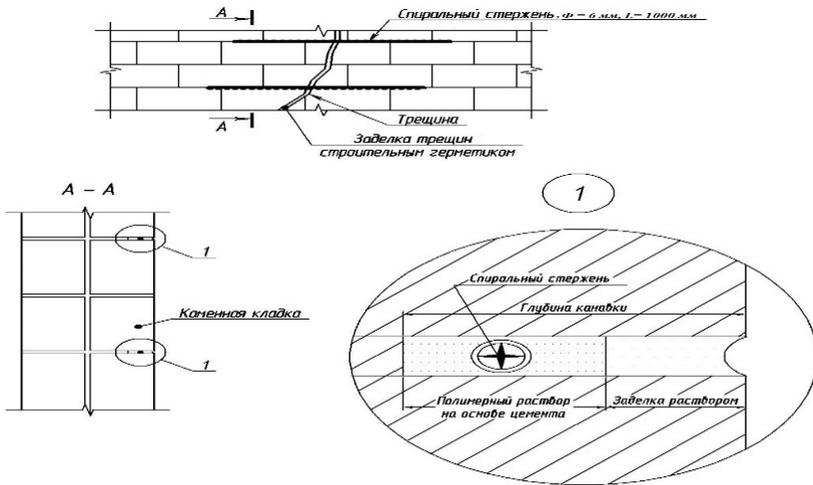


Рисунок 9 – Укрепление и заделка кладки Великой мечети г. Алеппо против трещин с помощью спиральных стержней из нержавеющей стали

С учётом предлагаемого усиления на следующем этапе была выполнена общая оценка сейсмостойкости Великой мечети в г. Алеппо. Расчёты производились с учётом разработанной ранее методики. Для этого была построена третья расчётная модель с характеристиками кладки, соответствующими её усилению:  $E_0 = 1500 \cdot 2 \cdot 17,95 = 53850$  МПа. Результаты расчёта подтвердили эффективность предлагаемого усиления.

Восстановление минарета Великой мечети г. Алеппо производится с использованием традиционных решений, принятых в сейсмостойком арабском строительстве с расчётным их обоснованием (рисунок 10).

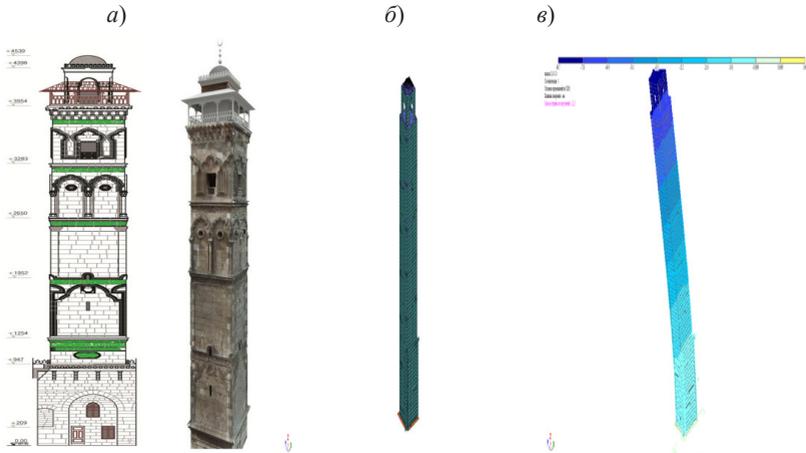


Рисунок 10 – Минарет Великой мечети г. Алеппо после восстановления:  
 а – минарет; б – расчетная модель минарета; в – мозаика перемещений в минарете

В *пятой главе* представлены результаты расчетно-теоретического исследования сейсмостойкости культового здания мусульманского зодчества по его усилению нетрадиционным методом, в качестве которого предлагается применить устройство сейсмоизоляции.

Технология установки сейсмоизолирующих опор в конструкциях архитектурных памятников широко известна в России и за рубежом. Учитывая конструктивные особенности рассматриваемого культового здания (наличие минарета, протяжённость длинных галерей и т. п.) на примере Великой мечети в г. Алеппо, была использована технология, разработанная М.Г. Мелкумяном и внедрённая в различные архитектурные памятники зодчества.

В диссертационной работе выполнены предпроектные проработки предлагаемой защиты, некоторые из которых представлены на рисунках 11, 12.

Суть и последовательность технологии заключаются в следующем: в стенах прорубается прямоугольный проём, в его нижней и верхней частях устанавливается арматурный каркас. Устанавливаются стальные пластины, и выполняется их анкеровка для крепления будущей сейсмоизолирующей резинометаллической опоры (РМО). Далее наращиваются арматурные каркасы влево и вправо и пропускаются по обеим сторонам стены для создания непрерывных нижней и верхней железобетонных балок по всему периметру здания непосредственно над фундаментом и под зданием соответственно. Затем выполняется их бетонирование. После достижения бетоном проектной прочности, РМО закрепляются на нижней стальной пластине (рисунок 11).

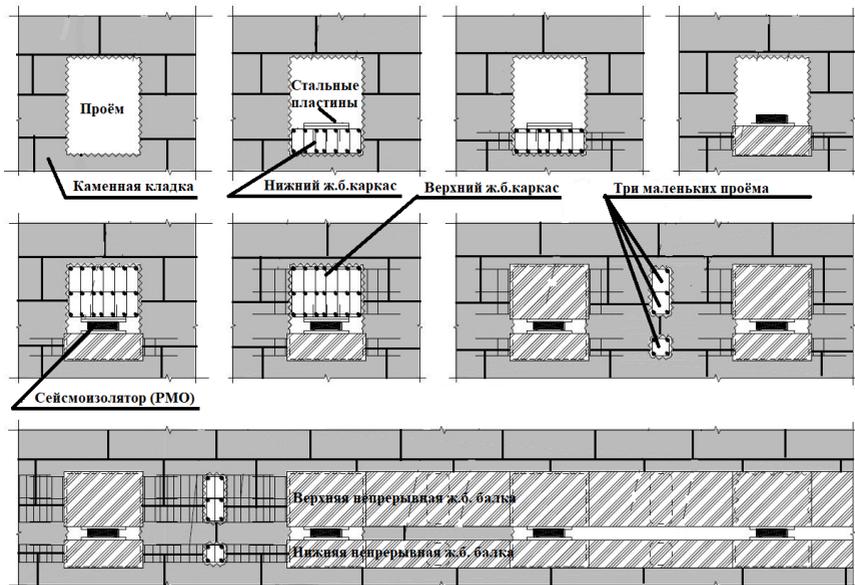


Рисунок 11 – Технология установки сейсмоизолирующих опор под стенами здания Великой мечети г. Алеппо

Схема расположения РМО и разрез расположенного РМО под зданием Великой мечети г. Алеппо показаны на рисунке 12.

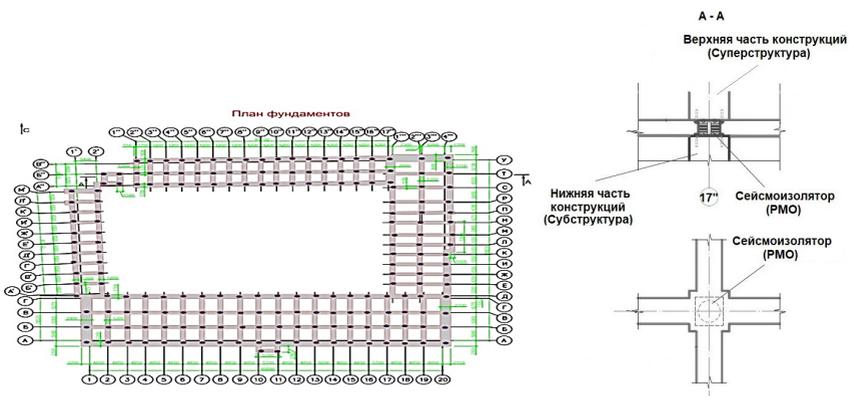


Рисунок 12 – Схема расположения сейсмоизолирующих опор под зданием Великой мечети г. Алеппо

Для оценки эффективности предлагаемых конструктивных мероприятий по сейсмоусилению на следующем этапе были выполнены расчетные

исследования. Расчет с системами самоизоляции выполнен также с учётом ранее разработанной методологии с учётом обоснованной интенсивности 8,6 баллов и различного частотного состава: высокочастотного ( $T = 0,1-0,3$  с), среднечастотного ( $T = 0,4-0,7$  с) и низкочастотного ( $T = 1,0-1,7$  с). Расчетная схема с системами самоизоляции и фрагмент с установленным сейсмоизолятором (РМО) показаны на рисунке 13.

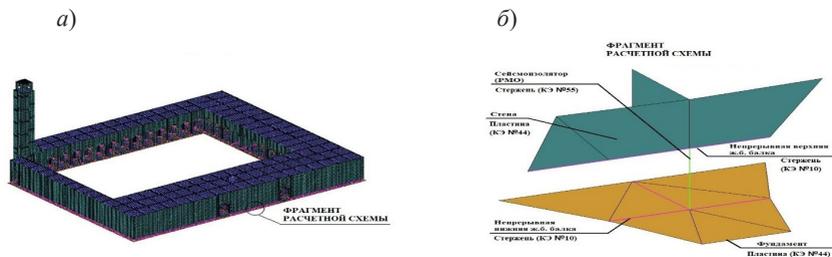


Рисунок 13 – Расчетная модель Великой мечети в г. Алеппо:  
 а – после сейсмоизоляции; б – фрагмент разреза установленной под зданием мечети сейсмоизолирующей опоры (РМО)

Некоторые результаты расчетов представлены на рисунке 14.

Расчётные исследования подтвердили эффективность применения предлагаемой сейсмозащиты для сейсмозащиты культовых зданий мусульманского зодчества.

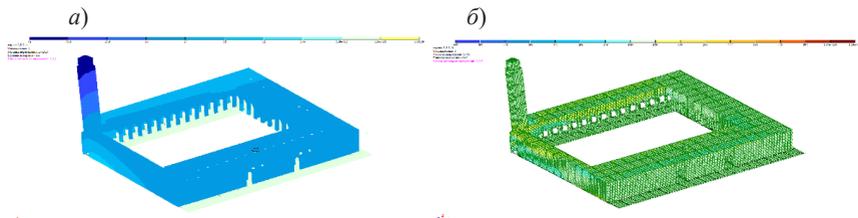


Рисунок 14 – Некоторые результаты расчета после сейсмоизоляции здания Великой мечети в г. Алеппо для 8,6 баллов: а – значения перемещений по  $X$ ; б – значения  $N_x$

Анализ результатов расчета показал, что предлагаемые конструктивные мероприятия с использованием традиционных и нетрадиционных методов обеспечивают необходимую сейсмостойкость рассматриваемого объекта, тем самым, сохраняя объект мировой архитектуры.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В заключении были подведены основные результаты и итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможности продолжения исследований.

1. Анализ сейсмической обстановки территории Сирии свидетельствует о её высокой активности вызванной наличием, находящихся вблизи её территории тектонических разломов, а также отсутствием в настоящее время, развитой сейсмологической службы, позволяющей вести постоянный контроль и мониторинг за возникающими сейсмическими воздействиями.

2. Анализ памятников архитектуры в Сирии, показал, что на этой территории существует большое количество памятников различных архитектурных направлений таких как Римской, Средневековой, Мусульманской и Османской культур, многие из которых входят в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, особо значимое место среди них по количеству людей, посещающих эти памятники, занимают культовые здания мусульманского зодчества.

3. Оценка последствий сильных землетрясений, прошедших на территории Сирии, показала, что степень повреждений в архитектурных памятниках имеет различный характер. Некоторые памятники имеют незначительные повреждения и дефекты в виде трещин, например, Мечеть Омара в г.Босра, некоторые имеют серьёзные повреждения, связанные с частичным обрушением элементов конструкции, например, в Великой мечети в г.Алеппо.

4. Последствия военных действий на территории Сирии с 2011 г. существенно добавили количество повреждений, а в некоторых случаях, привели к полному уничтожению некоторых частей памятников архитектуры. Выполненная предварительная оценка степени полученных повреждений на примере известных культовых зданий мусульманского зодчества показала, что наиболее ощутимые повреждения произошли в здании культового значения Великой мечети в г. Алеппо.

5. Для обоснования сейсмоусиления культовых зданий мусульманского зодчества выполнено уточнение реальной сейсмичности территории Сирии.

6. Разработана методика расчета применительно к культовым зданиям мусульманского зодчества с учетом возможных ущербов при землетрясениях различной интенсивности, позволяющая установить необходимый класс сейсмостойкости.

7. Выполнен расчетно-теоретический анализ культовых зданий на примере мечети в Алеппо без и с учетом повреждений. Установлено что наличие повреждений, вызванных военными действиями, может явиться причиной окончательного обрушения объекта.

8. Рекомендуется для повышения сейсмостойкости памятников архитектуры использовать традиционные и нетрадиционные подходы.

9. Оценка предлагаемых мер по сейсмоусилению с помощью традиционных и нетрадиционных подходов показала, что они позволяют сохранить аутентичность и оригинальный облик зданий и являются эффективными средствами сейсмозащиты.

**Перспективой дальнейшей разработки** данной темы является:

- возможность развития нормативной базы сейсмостойкого строительства в Сирии с учетом выполненных исследований в этой диссертации;

- распространение предлагаемых конструктивных мероприятий на другие памятники арабского зодчества.

## ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Публикации по теме исследования в изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. **Альдребби З.А.** Исторические каменные башни: обзор, сейсмическая уязвимость, поведение во время землетрясения, сейсмоусиление // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020. – № 6. – С. 49–66, DOI 10.37153/2618-9283-2020-6-49-66.
2. **Альдребби З.А.** Методика расчета культовых сооружений с учетом их заполняемости применительно к мечетям Ближнего Востока // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019.– № 2. – С. 43–48.
3. **Альдребби З. А.** Мониторинг и паспортизация наиболее известных памятников архитектуры в Сирии // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2018.– Т. 15, вып. 2.– С. 302–310.
4. **Альдребби З.А.** Повышение сейсмостойкости и усиление строительных конструкций архитектурных памятников в Сирии с помощью современных композитных материалов // Изв. Петерб. гос. ун-та путей сообщения. – СПб: ПГУПС, 2018. – Т. 15, вып. 4.– С. 576–582.
5. **Альдребби З.А.** Сейсмическая опасность территории Сирии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019.– № 6. – С. 43–48.
6. Белаш Т. А., **Альдребби З.А.** Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016.– № 5. – С. 58–63.
7. Белаш Т.А., **Альдребби З.А.** Оценка сейсмостойкости архитектурных памятников зодчества на территории Сирии // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2020.–1(44). – С. 21–25.
8. **Aldrebi Z.A.** Most suitable types of seismic isolation for use in old mosques in Syria/ Z. A. Aldrebi//Earthquake engineering. Constructions Safety, 2021, No. 1, pp.57–77, DOI 10.37153/2618-9283-2021-1-57-77.
9. **Aldrebi Z.A.** Strengthening of building structures of historical masonry buildings in Syria with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) rods and stainless steel helical rods. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 120–133. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-120-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-120-133).

### *Другие публикации по теме диссертации*

10. **Альдребби З.А.** Повреждения строительных конструкций памятников архитектуры Сирии: Сборник тезисов докладов национальной конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе-2019», Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО ПГУПС, 18 апреля 2019г.» // Сборник тезисов Национальной научно-технической конференции. – СПб: ПГУПС, 2020. – С.16–19.

11. **Альдребби З.А.** Повышение устойчивости минаретов мечетей против сейсмического и ветрового воздействий с помощью инерционных демпферов. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2020.– № 4. – С. 55–68.

12. **Альдребби З.А.** Сейсмостойкость архитектурных памятников Сирии. // Научно-практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Тезисы докладов. Москва, АО «НИЦ «Строительство», 1-2 декабря 2016 г. С. 121–122.

13. **Альдребби З.А.** Учет экономических и социальных потерь при оценке сейсмического риска для памятников архитектуры в Сирии: Сборник докладов научной конференции, посвященной 210-летию ПГУПС Императора Александра I и 155-летию кафедры «Здания» «Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга», Санкт-Петербург, ПГУПС, 17 апреля 2019г. – С.10–13.

14. Белаш Т.А., **Альдребби З.А.** Оценка повреждений Сирийских архитектурных памятников, полученных в результате землетрясений и военных действий. Теория и практика расчёта зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы. Международная научно-практическая конференция. Сборник докладов и тезисов. Москва, НИУ МГСУ, 21.06.2017 г. С. 49–53.

15. Белаш Т.А., **Альдребби З.А.** Оценка сейсмологической обстановки территории Сирии. XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием) 1-6 июля 2019 года, г. Санкт-Петербург, РАСС (Российская Ассоциация по Сейсмостойкому Строительству и защите от природных и техногенных воздействий). //Сборник тезисов конференции. – М.: 2019. – С. 90–91.

16. Belash T. A., **Aldrebi Z. A.** Assessment of Seismic Resistance of Islamic Architecture Monuments on the example of the Great Mosque of Aleppo taking into account the Seismic Zoning of the Territory of Syria, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering V.1079 (Number 5, chapter 4) (2021) 052036, 6 p., doi:10.1088/1757-899X/1079/5/052036.

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 24.03.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,34. Тираж 120 экз. Заказ 25.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.