

С. А. Тягунов

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК

*Учебное пособие для высших
учебных заведений*

Ашхабад
Издательство «БЫЛЫМ»
2024

УДК 378:550.3

Т 99

Тягунов С.

Т99 **Сейсмический риск.** Учебное пособие для высших учебных заведений – А.: Ылым, 2024. – 312 с.

Книга содержит вводный курс в изучение сейсмического риска и предназначена для студентов старших курсов (магистрантов) инженерно-строительного профиля, а также других инженерных специальностей в качестве дополнения к курсу «Безопасность жизнедеятельности». Кроме того, предполагается, что данный учебник может быть полезен для специалистов, занимающихся проблемами обеспечения сейсмической безопасности и ответственных за принятие решений в условиях чрезвычайных ситуаций, вызванных землетрясениями, а также представлять интерес для всех, проживающих на сейсмоопасных территориях и интересующихся данной тематикой.

Рецензенты:

Институт сейсмологии и физики атмосферы Академии наук Туркменистана, Ахмедова С.В.

Научно-исследовательский институт сейсмостойкого строительства Министерства строительства и архитектуры Туркменистана,
Лопашев В.А.

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт,
к.т.н. Сапарлиев Х.М., к.т.н. Мырадов Ё.Д.

Институт сейсмологии Академии наук Республики Узбекистан, д.г.-м.н., проф. Исмаилов В.А., д.ф.-м.н. Ибрагимов Р.С.

ГКПТ № 311 2024

ББК 26.1 я 73

© Тягунов С., 2024

© ПРООН, 2024

© Издательство, «Ылым» 2024



**ПРЕЗИДЕНТ ТУРКМЕНИСТАНА
СЕРДАР БЕРДЫМУХАМЕДОВ**



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕРБ ТУРКМЕНИСТАНА



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ФЛАГ ТУРКМЕНИСТАНА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИМН ТУРКМЕНИСТАНА

Жизнь отдать я готов за родимый очаг,
Духом предков отважных славны сыны,
Земля моя свята. В мире реет мой флаг –
Символ великой нейтральной страны!

Припев:

Великая, навеки созданная народом,
Держава родная, суверенный край,
Туркменистан – светоч и песня души,
Во веки веков ты живи, процветай!

Един мой народ, и по жилам племён
Течёт предков кровь – нетленная весть,
Не страшны нам бури, невзгоды времён,
Сохраним и умножим славу и честь!

Припев:

Великая, навеки созданная народом,
Держава родная, суверенный край,
Туркменистан – светоч и песня души,
Во веки веков ты живи, процветай!

ПРЕДИСЛОВИЕ

Глобальные статистические данные последних десятилетий свидетельствуют о заметном росте числа жертв и масштабов экономического ущерба от природных катаклизмов. По тяжести последствий землетрясения занимают одно из печально лидирующих мест среди всех природных бедствий. Особую опасность землетрясения представляют в связи с демографическим ростом, процессами урбанизации, уплотнением и развитием инфраструктур, а также строительством крупных и ответственных сооружений, в том числе гидростанций, промышленных объектов, мостов, высотных зданий и т.п.

В свете изложенного верным представляется утверждения выдающегося ученого Н. Н. Моисеева: «Риск и опасности в развитии цивилизации были, есть и будут. И нам придется приучить себя к мысли о необходимости жить под этим бременем. Но это означает лишь одно: человечеству необходимо научиться предельно снижать этот риск и опасность».

Все сказанное выше крайне актуально и для Туркменистана, южная часть которого расположена в сейсмически активном регионе Альпийско-Гималайского сейсмического пояса, где стыкуются Иранская, Туранская и Южно-Каспийская плиты, вовлеченные в процесс столкновения Аравии и Евразии. Таким образом значительная часть территории Туркменистана, включая его столицу Ашхабад и другие крупные города страны, расположена в районах с высокой сейсмической опасностью, где разрушительные землетрясения оставили свой катастрофических отпечаток. Ежегодно 6 октября в рамках Дня поминовения в Туркменистане отдается дань памяти жертвам Ашхабадского землетрясения 1948 года, одного из самых трагических сейсмических событий в истории человечества.

Принимая во внимание высокий уровень существующей сейсмической угрозы, для обеспечения полной и устойчивой реализации целей развития Туркменистана, Государственная программа реализации основных направлений политики в сфере

гражданской обороны особое внимание уделяет мероприятиям по снижению рисков стихийных бедствий, в том числе обеспечению сейсмической безопасности территории и населения.

Для достижения этих жизненно важных целей Правительство Туркменистана и Программа развития ООН (ПРООН) достигли соглашения о стратегическом объединении усилий в наращивании потенциала в управлении рисками стихийных бедствий в стране.

В рамках этой стратегической директивы в 2018 году был инициирован проект «Усиление национального потенциала Туркменистана по оценке сейсмических рисков, предупреждению и реагированию на потенциальные землетрясения».

Проект выполнялся совместными силами ПРООН (с привлечением национальных и международных консультантов) и Института сейсмологии и физики атмосферы (ИСФА) Академии наук Туркменистана при финансовой поддержке Правительства Туркменистана.

Пилотная деятельность проекта проводилась на территории Ашхабада для последующего применения успешной практики и подходов в аналогичной работе на территории других населенных пунктов страны, подверженных сейсмической опасности и сейсмическому риску.

Среди основных результатов проекта:

Проведение комплексной оценки сейсмических рисков г. Ашхабада.

Усиление научно-технического и кадрового потенциала Института сейсмологии и физики атмосферы АН Туркменистана для более эффективной работы в области оценки сейсмической опасности и мониторинга землетрясений, а также оценки сейсмических рисков.

Повышение уровня готовности к реагированию и ликвидации последствий при угрозе и возникновении бедствий, вызванных землетрясениями.

В рамках проекта было приобретено специальное оборудование и программное обеспечение, необходимое для проведения научных исследований и выполнения практических работ в области сейсмологии и сейсмостойкого строительства. В ходе проекта проводились специализированные тренинги, в которых принимали участие специалисты проектных и научных организаций, педагогический персонал учебных заведений Ашхабада, а также представители профильных министерств, работающих в области снижения рисков стихийных бедствий.

По итогам выполнения проекта получены новые важные результаты по оценке сейсмической опасности, сейсмической уязвимости и сейсмического риска на территории Ашхабада, подготовлены рекомендации и руководства по уменьшению уязвимости и риска, а также по подготовке к потенциальным землетрясениям и ликвидации их последствий.

На основе обобщения собранных данных о существующих направлениях обучения в области снижения риска бедствий разрабатывается учебная программа по оценке сейсмического риска для включения в учебные планы существующей системы образования Туркменистана.

Одним из итоговых и наиболее значимых результатов успешно завершившегося проекта является подготовка настоящего учебника по сейсмическому риску, который, безусловно, явится высокоэффективным средством повышения национального потенциала Туркменистана по оценке сейсмического риска для его целенаправленного снижения.

Васов О. К., Караев Д. И.

ВВЕДЕНИЕ

С самого своего возникновения человечество подвержено различным стихийным бедствиям. Среди многообразия природных процессов и явлений, представляющих опасность для человеческой жизнедеятельности, наибольшим разрушительным потенциалом обладают землетрясения, ежегодно причиняя мировому сообществу колоссальный экономический ущерб, исчисляемый многими миллиардами долларов, и унося человеческие жизни.

Проживая в сейсмических районах необходимо понимать, что будущие сильные землетрясения неминуемы и поскольку человечество не может их предотвратить, это означает, что сейсмический риск неизбежен.

Более того, мировые статистические данные показывают, что в условиях развития процессов урбанизации уровень рисков, связанных со стихийными бедствиями, в том числе землетрясениями, год от года возрастает. В связи с этим в последние годы учеными и специалистами разных стран, особенно расположенных в сейсмоопасных регионах планеты, уделяется большое внимание вопросам оценки и уменьшения сейсмического риска. Свидетельство этому все растущее число научно-исследовательских проектов и публикаций по соответствующей тематике.

Вместе с тем эти вопросы явно недостаточно представлены и мало освещаются в программе высших учебных заведений. До настоящего времени не существует специализированного учебника, который бы в полной мере охватывал и рассматривал комплексную проблему сейсмического риска и его компонентов в доступном для студентов изложении.

Цель данного учебника – восполнить существующий пробел и предоставить краткое систематизированное изложение комплекса вопросов, касающихся сейсмической опасности, сейсмической уязвимости и сейсмического риска для подготовки будущих специалистов инженерно-строительного профиля, а также инженерно-геологических и геофизических специальностей, ко-

которые планируют осуществлять свою профессиональную деятельность в сейсмически опасных районах.

Наука о сейсмическом риске имеет свою относительно недолгую историю, исчисляемую несколькими десятилетиями. Важные первоначальные достижения в этом сравнительно новом научном направлении неразрывно связаны с пониманием стохастической природы возникновения и проявления землетрясений, что обусловило применение вероятностных методов в расчетах сейсмической опасности и сейсмических воздействий. Кроме этого весьма важным шагом можно считать динамично развивающееся профессиональное взаимодействие специалистов-сейсмологов, занимающихся анализом и оценкой сейсмической опасности и представителей инженерно-строительной науки, занимающихся вопросами обеспечения сейсмостойкости сооружений.

Именно на основе концепции сейсмического риска происходит сближение и взаимодействие этих научных дисциплин о сейсмологии и сейсмостойкости, которые долгое время изучались отдельно.

Первые систематические исследования, посвященные проблемам оценки и анализа сейсмического риска, начались в 60-х – 70-х годах прошлого века. Публикации тех лет (в частности, Cornell, 1968, Algermissen et al., 1972, Grandori and Benedetti, 1973, Кейлис-Борок и др., 1973, Whitman et al., 1975) явились фундаментом для будущих исследований в этой жизненно важной области.

Как раз в те годы в международном научном сообществе сейсмологов и инженеров была признана необходимость четкого разделения понятий «опасность» и «риск». Было выработано единое мнение, что под термином «опасность» следует понимать эффекты, связанные с возникновением сейсмических воздействий, а под термином «риск» – вероятные разрушительные и губительные последствия этих воздействий.

В последующие годы, особенно в ходе Международной Декады по Уменьшению Опасности Стихийных Бедствий (МДУ-

ОСБ / IDNDR 1990–2000 годы), важность и злободневность этой проблемы получает все более широкое признание в мировом сообществе и привлекает все возрастающее внимание ученых и специалистов.

Смещение акцента с опасности на риск, вызванное чередой катастрофических землетрясений во всем мире, привело к разработке методов анализа сейсмической уязвимости и сейсмического риска в различных географических масштабах. Отметим, например, FEMA-NIBS (1989,1999), Chen et al. (1992, 2002), Методика... (1993, 1994, 2000, 2002), Zonno et al. (1998), ISDR-RADIUS (2000), Mouroux et al. (2004), Trendafiloski and Milutinovic (2004), Tyagunov et al. (2006, 2012), Molina et al. (2010), Pitolakis et al. (2014), Frolova et al. (2017), Silva et al. (2018), Xie et al. (2019), Böse et al. (2024)

Кроме вышеперечисленных авторов, различные аспекты оценки сейсмического риска в своих работах рассматривали Crowley H., Erdik M., Fäh D., Giovinazzi S., Grünthal G., Hancilar U., Khazai B., King S., Kiremidjian A., Kircher C., Lagomarsino S., Lang D., McGuire R., Pinho R., Schwarz J., Spence R., Stempniewski L., Wenzel F., Wyss M., Zschau J., Абаканов Т., Абакаров А.Д., Абдрахматов К.Е., Айзенберг Я.М., Акатъев В.А., Аминзода П., Ананьин И.В., Балассаян С.Ю., Бегалиев У.Т., Бержинская Л.П., Джинчвелашвили Г.А., Заалишвили В.Б., Ильясов И.Б., Исмаилов В.А., Клячко М.А., Кофф Г.Л., Ларионов В.И., Мавлянова Н.Г., Мкртычев О.В., Ордобаев Б.С., Оспанов А.К., Рагозин А.Л., Рашидов Т.Р., Сеитов Б.М., Смирнов В.И., Соколов В.Ю., Уздин А.М., Хакимов Ш.А., Эсенов Э.М. и многие другие исследователи.

Как уже отмечалось выше, в последние десятилетия вопросам обеспечения сейсмической безопасности с позиций сейсмического риска уделяется повышенное внимание во всем мире. Такая же тенденция наблюдается и в странах Центральной Азии. В настоящее время в регионе регулярно проводятся исследования по оценке сейсмического риска, выполняемые в рамках как национальных, так и международных проектов.

Одним из первых в этом ряду, вероятно, можно считать проект IDNDR-RADIUS, проводившийся в 1998-1999 гг. в рамках международной декады по уменьшению риска стихийных бедствий, когда среди 9 городов-образцов по всему миру в качестве представителя Центральноазиатского региона была выбрана столица Узбекистана – город Ташкент (ISDR-RADIUS, 2000). В рамках этого проекта, в частности, был разработан сценарий потенциального разрушительного землетрясения на территории города и разработан План действий по уменьшению сейсмической уязвимости и сейсмического риска и по подготовке к потенциальным будущим землетрясениям. Результаты проекта RADIUS явились заметным шагом к пониманию важности проблемы во всем регионе.

Далее последовали другие проекты по сейсмическому риску. Одни из них были посвящены оценке риска для территорий отдельных городов, в том числе, например, проект НАТО – Наука за мир, «Оценка и уменьшение сейсмического риска в Ташкенте (Узбекистан) и Бишкеке (Кыргызская Республика)» (2001–2004), проект JICA «Исследование по управлению рисками землетрясений для города Алматы в Республике Казахстан» (2007–2009), проект UNDP «Усиление национального потенциала Туркменистана по оценке сейсмических рисков, предупреждению и реагированию на потенциальные землетрясения» для территории Ашхабада (Туркменистан). Другие проекты рассматривали проблему в масштабе целой страны, например, проект Всемирного банка «Оценка сейсмического риска в Кыргызской Республике» (2015–2017) или всего региона, в том числе проект InWEnt-CASCADE «Предотвращение трансграничных природных катастроф в Центральной Азии» (2008–2010), проект EMCA «Модель землетрясений для Центральной Азии» (2011–2014), проект SFRARR «Единая региональная оценка риска для землетрясений и наводнений и анализа сценариев отдельных оползней для укрепления финансовой устойчивости и ускорения темпов снижения риска бедствий в Центральной Азии» (2020–2022).

Подробная библиография по соответствующей тематике может быть найдена в конце учебника.

Данное учебное пособие представляет собой вводный курс в изучение сейсмического риска и формирующих его факторов.

Предполагается, что уровень учебника соответствует студентам старших курсов инженерно-строительного профиля, а также других инженерных специальностей в качестве дополнения к курсу «Безопасность жизнедеятельности». Кроме того, книга может быть полезна для специалистов, занимающихся проблемами снижения риска и обеспечения сейсмической безопасности; поэтому содержательная часть учебника дополнена вопросами методики оценки уязвимости и риска.

Содержание учебника разделено на пять глав.

В первой главе даются общие сведения о тектонических землетрясениях, их возникновении, механизме и других характеристиках очага, а также о сейсмических волнах, вызывающих сотрясения земной поверхности. Кратко представлены сведения об основных характеристиках землетрясений, а также рассмотрены понятия магнитуды землетрясений и интенсивности сейсмических колебаний. Представлена информация о наиболее сильных и разрушительных землетрясениях, как во всем мире, так и на территории Туркменистана.

Вторая глава посвящена вопросам оценки сейсмической опасности. Обсуждаются различные проявления первичных и вторичных сейсмических эффектов и механизм их воздействия на объекты человеческой жизнедеятельности. Представлена информация о существующих шкалах измерения сейсмической интенсивности. Подробно изложены положения шкалы MSK-64, которая служит основным инструментом измерения сейсмической опасности в Туркменистане и в других странах региона. Кратко представлена информация о существующих методах оценки сейсмической опасности и сейсмического районирования территорий различного масштаба. Отдельно рассмотрены вопросы прогноза землетрясений.

Третья глава рассматривает вопросы сейсмической уязвимости сооружений. Показана взаимосвязь понятий сейсмостойкость и уязвимость. Рассмотрена повреждаемость различных типов зданий при сейсмических воздействиях. Обсуждаются основные факторы, влияющие на сейсмическую уязвимость зданий. Представлены существующие методы количественной оценки уязвимости, включая матрицы и графики вероятности повреждений, а также функции сейсмической уязвимости. Рассмотрены существующие типы зданий в Туркменистане и оценки их повреждаемости, на примере которых показана методика построения функций сейсмической уязвимости. Кратко рассмотрены современные методы оценки сейсмической уязвимости существующих зданий и застроенных территорий.

В четвертой главе рассматривается понятие сейсмического риска. Представлены основные положения и определения концепции риска. Рассмотрены главные факторы, определяющие уровень сейсмического риска. Представлены существующие подходы к оценке риска, включая детерминистический подход, основанный на рассмотрении сценарных землетрясений, а также, вероятностный подход. Приведены некоторые важные результаты проекта по оценке сейсмического риска для территории Ашхабада. Даны краткие сведения о проблемах оценки мульти-рисков на территориях, подверженных множественным опасностям.

Наконец, в пятой главе обсуждаются различные аспекты управления риском на разных уровнях. Дано краткое описание методов управления риском. Представлена концепция приемлемого риска и рассматривается возможность ее применения для целей управления риском. Рассмотрен подход к оптимизации антисейсмических мероприятий на основе концепции риска. Представлена методика разработки плана действий на основе сценария разрушительного землетрясения для территории города.

Кроме этого, учебное пособие содержит приложения, включая памятку-инструкцию с информацией о том, как обезопасить себя и свое имущество при землетрясениях, а также терминологический словарь. В заключение представлен список использо-

ванных литературных источников, а также рекомендуемых материалов для более глубокого изучения различных аспектов данной тематики.

Подготовка учебника выполнялась в рамках совместного проекта Института сейсмологии и физики атмосферы (ИСФА) Академии наук Туркменистана и Программы развития ООН (ПРООН) «Усиление национального потенциала Туркменистана по оценке сейсмических рисков, предупреждению и реагированию на потенциальные землетрясения», выполнявшегося при финансовой поддержке Правительства Туркменистана. Автор благодарен за предоставленную возможность внести свой сильный вклад в процесс наращивания потенциала и передачи знаний для обучения и подготовки нового поколения специалистов в области обеспечения сейсмической безопасности.

Искренняя признательность и глубокая благодарность коллегам из Туркменистана, в первую очередь, Караеву Д.И, с которым автор находился в постоянном общении в процессе выполнения работ по проекту, а также Беликову В.М, Лопашеву В.А., Абасееву С.С., Локкаеву А.Д., и Николаеву Н. за предоставленные информационные материалы, использованные при подготовке настоящего издания.

Автор благодарит Исмаилова В.А., Соколова В.Ю., Мавлянову Н.Г., Ибрагимова Р.С. за полезные обсуждения и советы, а также всех рецензентов за конструктивные замечания и ценные предложения, позволившие повысить качество материала учебного пособия.

І ГЛАВА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

1.1. Землетрясения и причины их возникновения

С точки зрения этимологии слово «землетрясение» на многих языках мира достаточно четко и образно отражает суть явления как «трясение земли». Если же задаться вопросом – «что такое землетрясение и чем оно характеризуется» с научной точки зрения, то от специалистов различного профиля можно услышать развернутые и уточняющие ответы, некоторые из которых представлены ниже.

С геофизической и сейсмологической точки зрения землетрясение – это внезапное высвобождение энергии в виде сейсмических волн, возникающее в результате образования разрыва горных пород в некотором ограниченном объеме называемом очагом землетрясения. Оно описывается магнитудой, в качестве основной энергетической характеристики землетрясения, а также параметрами очага (координаты, глубина, механизм и др.).

С инженерно-строительной точки зрения землетрясение – это колебания земной поверхности, вызываемые сейсмическими волнами и воздействующие на здания и сооружения. Сейсмические воздействия характеризуются интенсивностью и количественными параметрами колебаний, такими как амплитуда, частотный состав, длительность колебаний и др.

С социально-экономической точки зрения землетрясение – это стихийное бедствие, которое обладает огромным разрушительным потенциалом и способно нанести серьезный ущерб жизнедеятельности человека. Последствия прошлых землетрясений описываются в виде экономических и социальных потерь. Вероятные потери от потенциальных будущих землетрясений выражаются в терминах риска.

Эти дополняющие друг друга определения дают обобщенный портрет землетрясения, как непредсказуемого и опасного природного явления, возникающего в недрах Земли и вызывающего сотрясения на ее поверхности, что может представлять угрозу для человеческой жизнедеятельности.

Наука, изучающая процессы и явления, связанные с землетрясениями и распространением сейсмических волн, называется сейсмологией (от греческого *σεισμολογία* = *σεισμός* «землетрясение» + *λογία* «учение»).

Возникновение сейсмических волн, вызывающих сотрясения поверхности Земли, могут быть вызваны различными причинами. В зависимости от источника и характера возникновения сейсмических колебаний в соответствии с существующей классификацией (см., например, Потапов и др., 2019) землетрясения подразделяются на:

- тектонические (вызванные разрывами глубинных пород под воздействием тектонических напряжений);
- вулканические (связанные с подготовкой и извержением вулканов);
- обвально-провальные (причиной которых могут быть горные обвалы, обрушение кровли горных пород в карстовых полостях);
- ударные (вызванные падением на Землю небесных тел);
- искусственные (являющиеся проявлением подземных и наземных взрывов различного назначения);
- наведенные/техногенные (связанные с влиянием на геологическую среду хозяйственной деятельности человека, например, заполнением крупных водохранилищ, нефте- и газодобычей и пр.).

В последующем изложении основное внимание уделяется тектоническим землетрясениям, которые, являясь наиболее многочисленными, сильными и разрушительными, представляют собой основной источник сейсмического риска для жизнедеятельности человека.

1.2. Краткие сведения о строении Земли

Возникновение тектонических землетрясений (а также их пространственное распределение, механизм и другие характеристики) обусловлены строением нашей планеты и глубинными сеймотектоническими процессами. В связи с этим, для лучшего понимания природы тектонических землетрясений, рассмотрим основные понятия физики Земли.

Геофизическими исследованиями установлено, что наша планета имеет форму геоида, которую приближенно принято считать близкой к форме приплюснутого шара (средний диаметр которого составляет примерно 12742 км) и состоит из нескольких оболочек (Рис. 1.1).

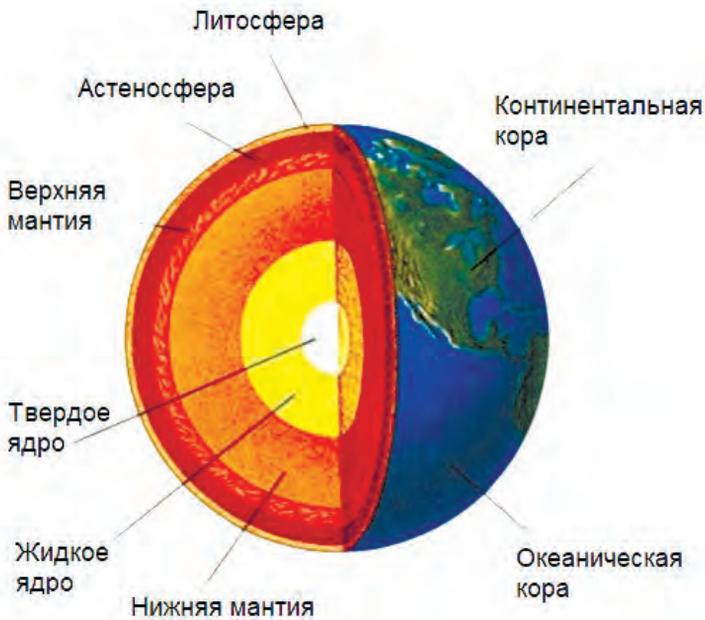


Рис. 1.1. Строение Земли

Во внутреннем строении Земли выделяются три основные оболочки: земная кора (самая верхняя и самая тонкая оболочка), мантия (занимающая большую часть объема земного шара) и ядро.

Толщина земной коры различается в разных районах планеты, варьируя от нескольких километров под океанами (океаническая кора) до нескольких десятков километров под континентами (континентальная кора); под горными массивами кора наиболее толстая (достигая 60–70 км под Гималаями). Под корой располагается верхняя мантия (мощность слоя которой достигает 1000 км) и далее – нижняя мантия (мощностью до 2000 км). В центре шара находится ядро планеты (радиусом примерно 3400 км), которое по своим свойствам подразделяется на внешнее ядро (жидкое) и внутреннее ядро (твердое).

Перечисленные выше оболочки Земли имеют многослойную структуру и различаются не только по своей мощности, но и по композиционному составу, химическим и физико-механическим свойствам, что отражается на скорости сейсмических волн, изучению которых геофизики и сейсмологи уделяют особое внимание при исследованиях земных недр. (В дальнейших параграфах сейсмические волны, их свойства и особенности распространения в геологических средах, также как их поверхностные эффекты и воздействие на здания и сооружения будут рассмотрены более детально).

Из всех оболочек Земли наиболее неоднородной является кора. Континентальная земная кора состоит, как правило, из трех слоев, включая верхний слой осадочных пород. Осадочные породы различного состава и происхождения могут составлять несколько метров или достигать нескольких километров. Осадочный слой лежит на более плотном слое скальных пород, который называется «гранитным» и толщина которого в различных районах может варьировать от 10 до 40 км. В случае отсутствия осадочных пород скальные породы могут выходить на дневную поверхность. Ниже гранитного слоя располагается слой, называемый «базальтовым», состоящим из более плотных пород. Мощность базальтового слоя в разных районах планеты составляет 20–30 км.

На границе верхнего (гранитного) и нижнего (базальтового) слоев земной коры исследованиями выявлено скачкообразное

увеличение скорости прохождения сейсмических волн за счет резкого изменения физико-механических свойств между этими слоями. Геофизики называют эту условную границу *границей (поверхностью) Конрада*. Эта сейсмическая граница получила название в честь австрийского сейсмолога Виктора Конрада, который впервые обнаружил ее существование в 1925 г., исследуя распространение сейсмических волн в Альпах. Следует отметить, однако, что, как показывают более поздние исследования, в некоторых районах Земли эта сейсмическая граница может не иметь такой резкой выраженности.

Под нижним слоем земной коры располагается верхняя мантия. На границе между корой и мантией также наблюдается резкое изменение физических свойств земного вещества, что выражается в скачкообразном изменении (увеличении) скоростей продольных и поперечных сейсмических волн. Эта сейсмическая граница называется границей *(поверхностью) Мохоровичича (или просто Мохо)*. Она названа в честь хорватского ученого сейсмолога и геофизика Андрия Мохоровичича, впервые выявившего ее в 1909 г. Исследования показывают, что поверхность Мохоровичича прослеживается по всему земному шару и, как правило, повторяет местный рельеф поверхности, как бы являясь его зеркальным отражением. Глубина границы Мохоровичича и, соответственно, мощность земной коры растет в континентальных частях и уменьшается в океанических частях планеты.

От границы Мохоровичича до внешнего ядра Земли простирается мантия, которая разделяется на верхнюю и нижнюю мантии. В верхней части в интервале глубин 410–670 км находится переходная зона (иногда называемая *слоем Голицына* в честь российского геофизика Бориса Голицына), где наблюдаются неравномерные изменения скорости сейсмических волн.

На больших глубинах (в нижней мантии) скорости волн продолжают плавно и равномерно увеличиваться вплоть до внешнего ядра, достигая своих максимальных значений у границы между нижней мантией и ядром.

Между нижней мантией и внешним ядром располагается еще одна контрастная сейсмическая граница, которую часто называют *границей Гутенберга*, в честь немецко-американского ученого-сейсмолога Бено Гутенберга. На этой границе происходит скачкообразное уменьшение скорости продольных сейсмических волн. Как показывают исследования, поперечные волны через внешнее ядро не распространяются, что свидетельствует о том, что оно жидкое. Далее, с увеличением глубины более 5000 км находится граница внутреннего ядра, на которой наблюдается скачкообразное увеличение скорости продольных волн и снова обнаруживаются поперечные волны, что говорит о том, что внутреннее ядро твердое.

1.3. Тектоника плит

Для понимания природы возникновения тектонических землетрясений рассмотрим основные положения теории тектоники плит, на основе которой объясняются такие явления как сейсмическая и вулканическая деятельность, горообразование и другие геологические процессы.

Истоки этой теории восходят к теории дрейфа материков, предложенной в 1912 году немецким ученым Альфредом Вегенером на основе накопившихся к тому времени научных данных. Теория дрейфа материков первоначально была отвергнута, однако по мере накопления новых научных данных, многие ее положения послужили основой для создания современной тектоники плит.

В рамках теории тектоники плит в верхней части Земли (включающей земную кору и часть верхней мантии) выделяется два слоя: литосфера и астеносфера. Это разделение осуществляется с позиций реологии, то есть с учетом деформационных свойств земного вещества в этих слоях.

Литосферой (от греческого λίθος «камень» + σφαίρα «шар») называется твердый верхний слой, состоящий из земной коры и

верхней части мантии. Под литосферой расположен слой называемый астеносферой ($\alpha\sigma\theta\epsilon\nu\acute{o}\varsigma$ «слабый» + $\sigma\phi\alpha\acute{\iota}\rho\alpha$ «шар»), который характеризуется пластичными свойствами. То есть с точки зрения реологической механики литосфера («каменная оболочка») представляет собой относительно упругий, твердый и хрупкий слой, тогда как астеносфера – это пластичный, податливый и подвижный слой.

Согласно современному подходу литосфера Земли делится на ограниченное число тектонически обособленных блоков (называемых литосферными плитами), в том числе выделяется восемь крупных плит, десятки плит среднего размера и множество мелких.

Среди наиболее крупных литосферных плит выделяются: Тихоокеанская (Pacific Plate), Северо-Американская (North American Plate), Евразийская (Eurasian Plate), Африканская (African Plate), Антарктическая (Antarctic Plate), Австралийская (Australian Plate), Южно-Американская (South American Plate), Индостанская (Indian Plate). Как показано на рис.1.2 (Bitton M., CC BY-SA 3.0, Wikimedia Commons), эти литосферные плиты покрывают большую часть поверхности Земли.

Основанием для выделения границ литосферных плит послужило пространственное распределение очагов землетрясений, то есть предполагается, что вся основная сейсмическая, тектоническая и вулканическая активность сконцентрирована на границах плит, тогда как сейсмичность внутри плит гораздо слабее.

Литосферные плиты находятся в постоянном движении относительно друг друга. При этом, описываемые как твердые тела, они как бы «плавают» на подвижном слое астеносферы. Согласно классической теории тектоники плит, главной причиной движения литосферных плит является конвекция в астеносфере.

Существует три основных типа относительных перемещений на границах литосферных плит: *дивергентные* (расхождение), *конвергентные* (схождение), *трансформные* (сдвиг).

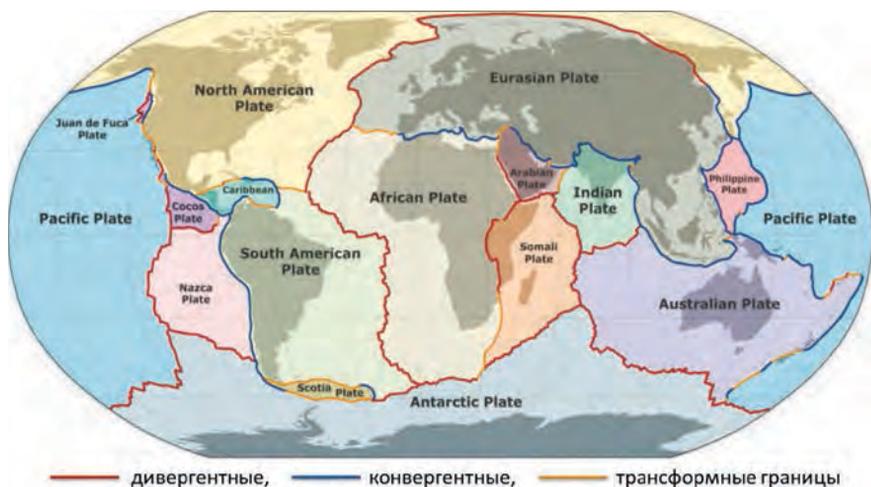


Рис. 1.2. Литосферные плиты и их границы

На дивергентных границах (в местах расхождения плит в противоположные стороны) вследствие разрывов земной коры образуются протяженные впадины (это так называемые процессы *рифтинга*), а в результате поднятия в зону разлома мантийных пород и их последующей кристаллизации, происходит формирование новой коры и расширение океанического дна (процессы *спрединга*). На конвергентных границах, где наблюдается схождение континентальных и океанических плит, происходит их сложное взаимодействие (так называемые процессы *коллизии* и *субдукции*), сопровождаемое горообразованием. На трансформных границах, где имеют место горизонтальные смещения плит относительно друг друга, также могут наблюдаться соответствующие изменения континентального ландшафта и океанического дна (см., например, Короновский, 2006).

Рассматривая карты сейсмичности Земли (см. Рис.1.3, NASA, DTAM project team © Public Domain), можно видеть, что все основные зоны или пояса сейсмичности, в которых расположены очаги наиболее сильных землетрясений, совпадают с границами литосферных плит.

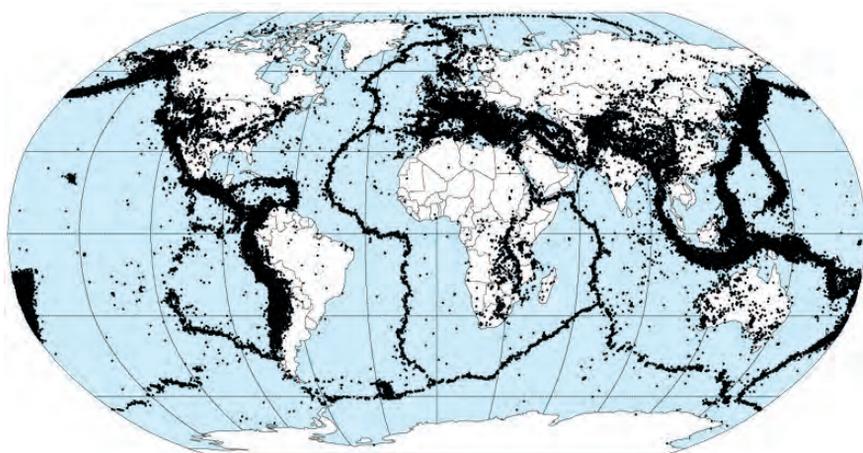


Рис. 1.3. Землетрясения и границы литосферных плит

1.4. Тектонические землетрясения и их характеристики

Взаимодействие литосферных плит является одним из основных источников формирования поля напряжений в самой верхней оболочке Земли, причем основная концентрация напряжений возникает в пограничных областях плит.

Нетрудно понять, что на дивергентных границах преобладают напряжения растяжения, конвергентных – напряжения сжатия, а трансформных – сдвиговые напряжения. Поскольку толщина и жесткость плит неодинакова, они обычно находятся в условиях сложного напряженного состояния. При этом одна часть плиты может находиться в условиях растяжения, другая – в условиях сжатия, или в условиях сдвига.

В результате продолжающейся тектонической деятельности происходит накопление энергии в деформированных (сжимаемых, растягиваемых или сдвигаемых) земных породах. Это очень длительный процесс, который протекает в различных точках литосферы и может продолжаться до тех пор, пока напряжения не достигнут предела прочности пород в очаге потенциального землетрясения. И в тот момент, когда напряжения в материале

некоторого ограниченного объема достигают своих предельных значений, происходит внезапный разрыв, который начинается в некой критической точке разлома и затем распространяется в виде быстро растущих разломов, трещин и сдвигов. Этот процесс сопровождается высвобождением накопленной потенциальной энергии в виде сейсмических волн, распространяющихся в окружающей среде. Область зарождения землетрясения, в которой возникает разрыв со смещением горных пород, и откуда распространяются сейсмические волны, называется *очагом землетрясения*.

Механизм очага землетрясения определяется в соответствии с типом подвижки (смещения) по разлому. Сейсмологами выделяются три основных типа механизмов очага: сдвиг, сброс и взброс (см., например, Воронина, 2004).

При сдвиге смещение по разрыву происходит преимущественно в горизонтальной плоскости (смещение по простираанию), при взбросе и сбросе – в вертикальной (смещение по падению). Движение определяется по смещению висячего блока относительно лежащего. Висячим называется блок, плоскость разрыва которого имеет острый угол с горизонтом, лежащим – блок с плоскостью разрыва, образующей тупой угол с горизонтом. Если висячий блок смещается вниз, разрыв представляет собой сброс (*normal fault*). Если же висячий блок перемещается вверх, разрыв называется разломом взбросового типа (*reverse fault*) (при пологом наклоне плоскости разрыва последний называют *надвигом*) (*thrust fault*).

Сбросы образуются в условиях тектонического растяжения, а взбросы и надвиги характерны для условий тектонического сжатия. В зависимости от особенностей напряженно-деформированного состояния в очаговой области могут проявляться и другие типы подвижек. Чаще всего механизм очага землетрясения представляет собой сочетание основных типов (например, сбросо-сдвиг, сдвиго-взброс и т.д.).

Условная точка в центре очага землетрясения (откуда начинается разрыв) называется *гипоцентром* землетрясения (иногда

также используется термин фокус землетрясения), а его проекция на поверхность Земли называется *эпицентром* землетрясения. Соответствующее расстояние между двумя этими точками по вертикали называется *глубиной очага* землетрясения.

По глубине очага землетрясения принято делить на три типа: *мелкофокусные* с глубиной очага до 70 км, *среднефокусные* (или промежуточные) с глубиной от 70 до 300 км, *глубокофокусные* при глубине очага более 300 км.

Как уже подчеркивалось выше, большинство очагов землетрясений сконцентрировано вдоль границ литосферных плит. Такие землетрясения называются *межплитными*. Наблюдения показывают, что наибольшее число сильнейших, а также самых глубоких межплитных землетрясений приурочено к зонам субдукции.

Однако землетрясения происходят также внутри плит далеко от их границ. Такие землетрясения называются *внутриплитными*. В рамках существующей теории полагается, что эти землетрясения происходят в ослабленных зонах литосферных плит, где происходит локальное высвобождение энергии, накапливаемой в толще плит.

Внутриплитные землетрясения являются менее частыми и не имеют такой выраженной концентрации в пространстве по сравнению с межплитными землетрясениями. Как правило, они являются мелкофокусными и при этом имеют более разнообразный и более сложный механизм очага.

Сейсмическая активность может проявляться в виде одиночных землетрясений, однако, как правило, землетрясения группируются как в пространстве, так и во времени. Активизация сейсмического процесса может быть следствием перераспределения напряжений в земной толще в результате малых или, наоборот, больших «триггерных» событий, то есть слабые землетрясения могут вызывать более сильные, а крупные землетрясения сопровождаются более слабыми событиями.

Говоря о последовательностях сейсмических событий, различают *форшоки* (от английского foreshock) и *афтершоки* (от

английского aftershock). Кроме того существуют так называемые рои землетрясений.

Форшоками называются землетрясения, предшествующие главному толчку, свидетельствующие о ступенчатом процессе разрыва. Они, как правило, являются более слабыми. Форшоковая активность содействует перераспределению напряжений в земной коре и тем самым может вызвать возникновение большого землетрясения.

Афтершоками называются повторные сейсмические толчки, которые возникают после главного землетрясения, показывая продолжение процесса разрядки напряжений в очаговой зоне. При этом в толще горных пород, окружающих очаг главного землетрясения, могут возникать новые разрывы.

Число афтершоков может быть очень велико и после сильных землетрясений они могут проявляться месяцами. Афтершоковая активность может быть особенно высока в первые часы и дни после основного толчка, что связано с резким перераспределением напряжений и возникновением новых разрывов в толще горных пород. Сильные афтершоки могут вызывать разрушение зданий, поврежденных основным толчком, и затруднять проведение спасательных работ.

Роем землетрясений называется особый вид проявления сейсмической активности, когда в небольшом пространственно-временном объеме группируется (иногда очень многочисленная) последовательность сильных и слабых толчков без выраженного главного толчка.

По результатам многолетних наблюдений сейсмологами установлено, что в глобальной статистике сейсмических событий доля этих явлений в сейсмическом процессе распределяется примерно следующим образом: одиночные землетрясения (10%), форшоки (20%), рои (30%), афтершоки (40%).

Важно отметить, что однозначное определение каждому из этих взаимосвязанных явлений, которые являются частью единого процесса разрядки в зоне разлома, можно дать только после окончания всей последовательности сейсмических событий (иногда спустя годы).

1.5. Сейсмические волны и их распространение

Как было рассмотрено выше, в результате быстрого разрыва материала в очаге землетрясения происходит переход потенциальной энергии, накопленной в деформированных (сжимаемых, растягиваемых или сдвигаемых) породах Земли, в кинетическую энергию колебаний, распространяющихся в виде сейсмических волн. Возникающие в очаге сейсмические волны излучаются во все стороны, в том числе и к земной поверхности. Сейсмические волны несут с собой энергию колебаний, которая постепенно рассеивается в слоях земной среды, в результате чего по мере удаления от очага происходит затухание волн.

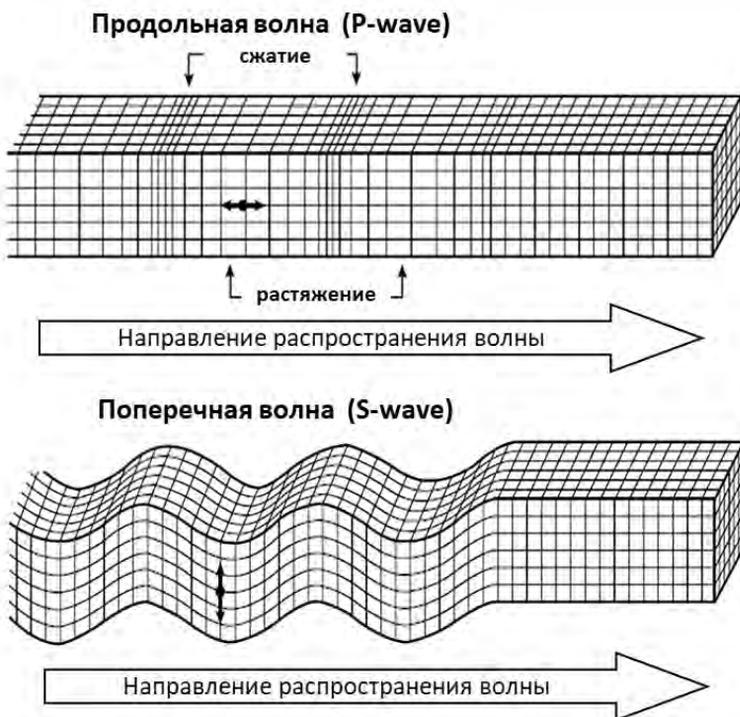


Рис. 1.4. Объемные сейсмические волны

В P-волнах частицы среды движутся вперед и назад вдоль направления распространения волны, они по очереди то сжима-

ют, то растягивают вещество. Это волны сжатия-растяжения, они могут распространяться в любых средах (не только в твердых телах, но и в жидких, и в газообразных средах).

В S-волнах колебания происходят перпендикулярно направлению распространения фронта волн, причем поперечные колебания частиц среды могут происходить как в горизонтальной плоскости (SH), так и в вертикальной плоскости (SV). При этом объем среды не меняется, волны создают в среде сдвиговые напряжения (в жидкостях и газах, не обладающих упругостью формы, поперечные волны не распространяются).

Сейсмические волны характеризуются скоростью распространения колебаний (V), амплитудой (A), периодом колебаний (T) и длиной волны (L).

$$L = V * T.$$

Из курса теории упругости известны следующие выражения, которые определяют скорости распространения продольной (V_p) и поперечной (V_s) объемных волн в упругой изотропной среде:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

где:

ρ – плотность среды;

λ и μ – упругие модули Ламе, связанные с модулем Юнга (E) и коэффициентом Пуассона (ν) следующими соотношениями:

$$\lambda = \frac{Ev}{(1-2\nu)(1+\nu)}; \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Из представленных соотношений видно, что скорость продольных волн всегда выше, чем скорость поперечных волн. Скорость продольных волн V_p в земной коре в зависимости от плотности и упругих свойств среды, через которые эти волны проходят, может достигать 8 км/с, в мантии эта скорость может возрастать до 13 км/с. Скорость поперечных волн V_s в земной коре в среднем

в 1,7 раза меньше скорости продольных V_p , зато амплитуда этих колебаний намного больше. Важно заметить, что S-волны вызывают, как правило, более энергичные и разрушительные толчки.

Поверхностные волны образуются в результате сложного взаимодействия объемных (продольных и поперечных) волн с поверхностью Земли. Как следует из определения, они распространяются вдоль земной поверхности и захватывают лишь неглубокую зону под ней (порядка длины волны). Скорость распространения у поверхностных волн меньше, чем у объемных волн и они имеют более длинные периоды (или, соответственно, более низкие частоты).

Выделяют два наиболее важных типа поверхностных волн: волны Лява (Love-waves) и волны Рэлея (Rayleigh-waves), названные по именам исследовавших их английских ученых (Рис. 1.5).

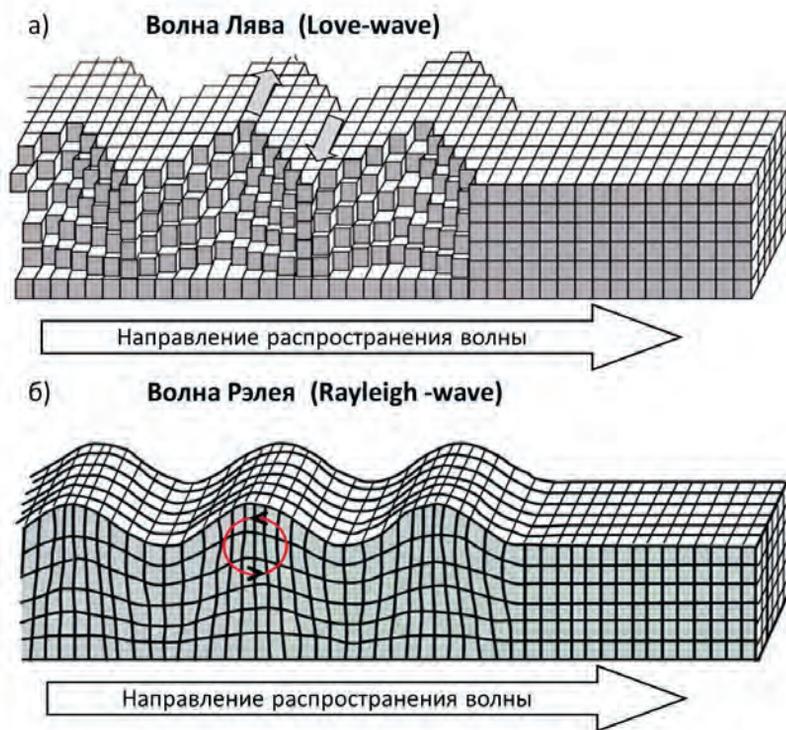


Рис. 1.5. Поверхностные сейсмические волны

Волны Лява (*Рис. 1.5, а*) движутся вперед и одновременно заставляют частицы грунта колебаться из стороны в сторону в горизонтальной плоскости, параллельной поверхности Земли, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению распространения этих волн.

Волны Рэлея (*Рис. 1.5, б*) также движутся вперед, в то время как отдельные частицы среды движутся по вертикали и горизонтали в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению распространения волн. Каждая частица при этом движется по эллипсу.

Поверхностные волны затухают гораздо медленнее, чем объемные, поэтому с удалением от эпицентра, по мере затухания продольных и поперечных волн, именно поверхностные волны преобладают по интенсивности и переносимой энергии колебаний (при очень сильных землетрясениях такие волны могут даже обегать вокруг земного шара).

На *Рис.1.6* схематично показан пример сейсмограммы, на которой можно видеть последовательность вступления различных сейсмических волн при регистрации землетрясений.

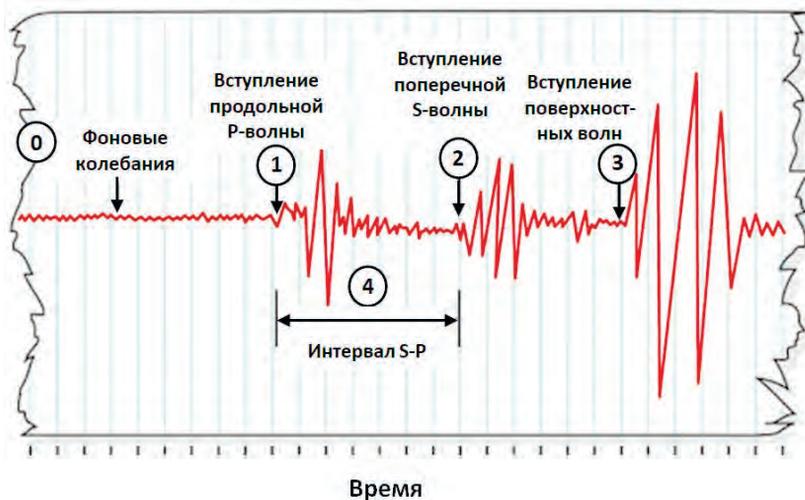


Рис. 1.6. Последовательность вступления сейсмических волн на сейсмограмме землетрясения

На начальном участке записи (от 0 до 1), хотя землетрясение уже произошло, но пока сейсмические волны еще не достигли пункта регистрации, присутствуют только фоновые колебания, которые имеют относительно низкий амплитудный уровень. Такого рода колебания земной поверхности (также называемые микросейсмами или микросейсмическим шумом) могут иметь как природное, так и техногенное происхождение.

В некоторый момент времени (1) на сейсмограмме отмечается заметный амплитудный скачок, вызванный приходом в пункт наблюдения продольной сейсмической волны. Далее с некоторым запаздыванием, которое, как правило, составляет несколько секунд, в момент времени (2) на сейсмограмме регистрируется поперечная волна. И последними в пункт регистрации приходят поверхностные волны (3).

Временной интервал между приходом Р-волны и S-волны, длительность которого существенным образом зависит от удаленности пункта наблюдения от очага землетрясения, имеет важное практическое значение.

С одной стороны, значения этого интервала времени (S-P), полученные из сети сейсмических станций, позволяют сейсмологам определять положение эпицентра землетрясения (см., например, Vormann et al., 2014).

С другой стороны, рассматривая вступление Р-волны как сигнал о произошедшем землетрясении, этот довольно небольшой промежуток времени до прихода более разрушительных сейсмических волн (который составляет от нескольких секунд до нескольких десятков секунд) может быть использован для целей раннего оповещения о пробудившейся сейсмической угрозе.

Подобные системы раннего оповещения (*earthquake early warning systems*), являющиеся частью программы снижения и управления риском, разрабатываются в высокосейсмичных регионах, для того, чтобы в случае сильного землетрясения иметь возможность предпринять экстренные шаги для уменьшения последствий возможной катастрофы (см., например, JMA, 2007, Allen et al., 2009, Stankiewicz et al., 2015).

1.6. Регистрация землетрясений и сейсмических колебаний

Сейсмические волны, распространяющиеся от очага землетрясения, несут с собой не только энергию колебаний, которые могут оказать разрушительное воздействие на здания и сооружения, но и важную информацию для ученых и специалистов, занимающихся проблемами сейсмологии и сейсмостойкого строительства.

Информация, получаемая в виде записей сейсмических колебаний, представляет огромный практический интерес как для более глубокого изучения очаговых зон и сейсмогеологических характеристик данного региона (без чего невозможна адекватная оценка сейсмической опасности территории), так и для лучшего понимания региональных особенностей сейсмических воздействий (что необходимо для совершенствования методов сейсмостойкого проектирования и строительства).

Как образно заметил Борис Голицын в своих «Лекциях по сейсмометрии»: *«Можно уподобить всякое землетрясение фонарю, который зажигается на короткое время и освещает нам внутренность Земли, позволяя тем самым рассмотреть то, что там происходит. Свет этого фонаря пока еще очень тусклый, но не подлежит сомнению, что со временем он станет гораздо ярче и позволит нам разобраться в этих сложных явлениях природы»* (Голицын, 1912).

Для регистрации сейсмических колебаний используются специальные приборы, называемые *сейсмографами* или *сейсмометрами*. Чувствительность этих приборов такова, что позволяет записывать колебания, как в ближней зоне землетрясения, так и далеко за ее пределами. Раздел науки занимающийся вопросами регистрации сейсмических колебаний называется *сейсмометрией*.

Первый известный сейсмометрический инструмент, который можно точнее назвать «сейсмоскоп», изобрел китайский ученый Чжан Хен почти две тысячи лет назад. Современная реконструкция этого сейсмоскопа показана на (Рис. 1.7).



Рис.1.7. Сейсмокоп Чжан Хена

На поверхности бронзового сосуда, внутри которого находился статический маятник, располагались восемь драконов, ориентированных по разным направлениям. Каждый дракон держал в пасти небольшой шарик, а у подножия сейсмокопа непосредственно под драконами находились восемь лягушек с разинутой пастью.

В случае достаточно сильного землетрясения под воздействием сейсмической волны внутренний маятник приходил в движение и ослаблял челюсти соответствующего дракона, в результате чего шарик падал в пасть находящейся под ним лягушки. Таким несложным образом этот прибор позволял определить приблизительное направление эпицентра произошедшего землетрясения. К сожалению, это была единственная информация, получаемая с помощью сейсмокопа, хотя это, конечно, не умаляет научных заслуг древнего изобретателя.

За прошедшие века наука и техника шагнули далеко вперед и вполне естественно, что сейсмометрическое оборудование современных сейсмостанций обладает гораздо более широкими возможностями для записи, обработки и анализа получаемых сейсмических данных.

Эффективность системы сейсмических наблюдений особенно возросла после того как отдельные сейсмостанции стали объединять в сейсмические сети. Важность и практическую пользу получаемой с их помощью информации невозможно переоценить.

Анализ записей землетрясений, зарегистрированных высокочувствительными инструментами, позволяет определить магнитуду и координаты сейсмического события, а также диагностировать его природу (взрыв или землетрясение).

На основе данных сейсмических наблюдений составляются каталоги землетрясений и определяются характеристики сейсмической активности региона (включая построение графиков повторяемости землетрясений).

Полученные записи колебаний используются для определения интенсивности сейсмических воздействий и их амплитудно-частотных характеристик, на их основе определяются закономерности затухания колебаний с расстоянием. Все эти данные необходимы для расчетов сейсмической опасности и сейсмического риска.

В настоящее время по всей поверхности Земли установлены многие тысячи приборов для записи сейсмических колебаний, объединенные в сети локального, регионального, национального масштаба. Многие национальные и региональные сети осуществляют обмен сейсмическими данными, полученными различными станциями, в режиме реального времени и объединяются в сети глобального масштаба, такие как, например, Global Seismic Network (GSN), International Monitoring System (IMS), GEOFON Seismic Network и другие.

На рис.1.8 показаны примеры записей сейсмических колебаний реального землетрясения.

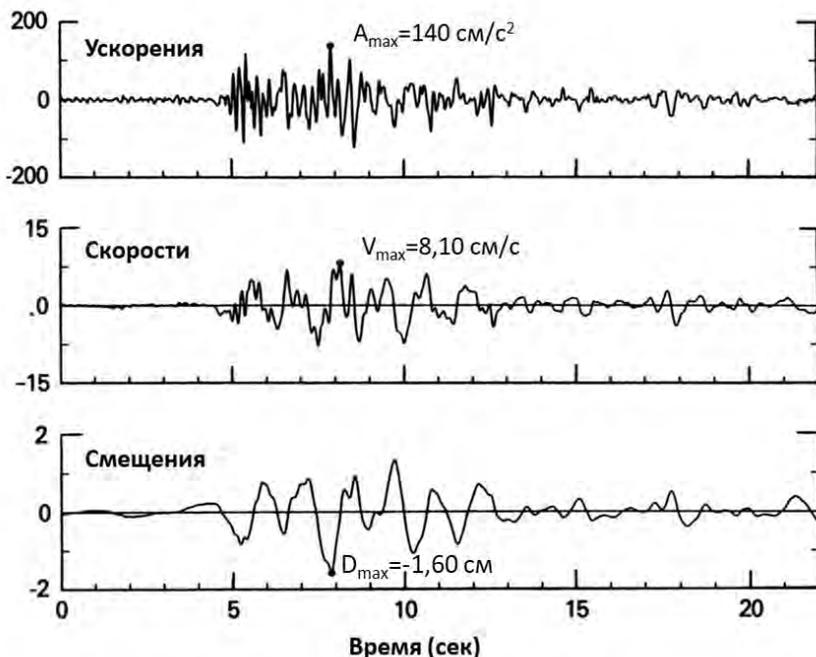


Рис. 1.8. Акселерограмма (а), велосигграмма (б) и сейсмограмма (в) землетрясения

Заметим, что иногда любую запись сейсмических колебаний называют сейсмограммой. Однако, строго говоря, следует различать, что *сейсмограммой* называется запись колебательных смещений, тогда как запись скорости колебаний называется *велосигграммой* (от английского «velocity / скорость»), а запись ускорений колебаний называется акселерограммой (от английского «acceleration / ускорение»).

Значения колебательных смещений выражают в единицах длины (см или мм), а значения скоростей колебаний (на велосигграммах), соответственно, в см/с (также в м/с или мм/с). Значения ускорений (на акселерограммах) выражают либо в см/с² (также в м/с² или мм/с²), либо в долях g (ускорение свободного падения $g = 980 \text{ см/с}^2$).

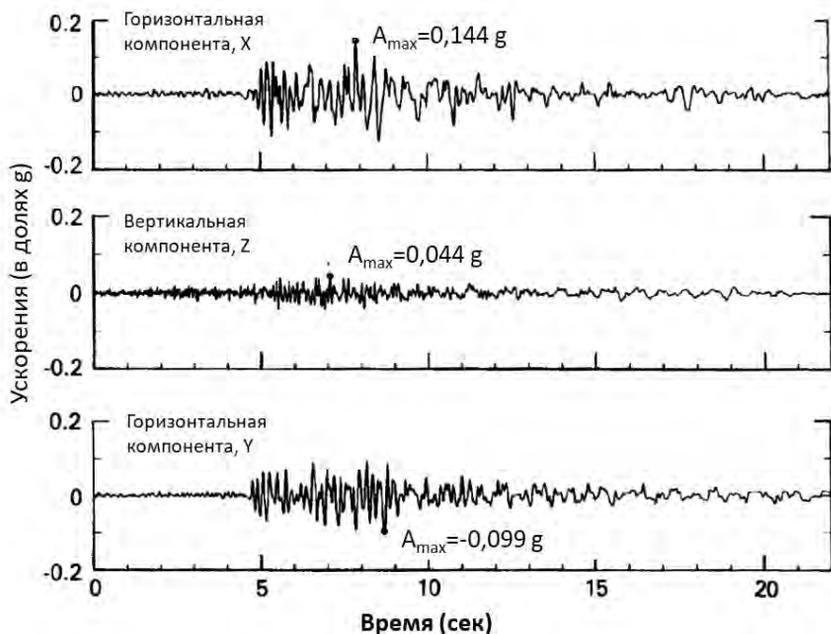


Рис.1.9. Трехкомпонентная акселерограмма землетрясения

Движения, вызванные прохождением сейсмических волн, представляют собой очень сложную пространственную траекторию, поэтому в практических целях вектор сейсмических колебаний раскладывается на компоненты. Таким образом, регистрация сейсмических колебаний (ускорений, скоростей и смещений) осуществляется по трем ортогональным компонентам X–Y–Z, включая две горизонтальные (как правило, ориентированные по сторонам света) и одну вертикальную компоненты.

При установке сейсмоприемников традиционно выбирают, чтобы ось X была направлена на север, ось Y – на восток, а ось Z – вертикально вверх (при установке сейсмоприемников вблизи известных тектонических разломов их горизонтальные оси могут быть ориентированы вдоль линии разлома и в перпендикулярном к нему направлении).

На рис.1.9 представлены три компоненты акселерограммы землетрясения (вверху и внизу горизонтальные компоненты X и Y, а посередине – вертикальная компонента Z).

Основными характеристиками каждой из полученных записей сейсмических колебаний являются: амплитудный уровень и частотный состав колебаний, а также их длительность. Стоит подчеркнуть, что амплитуды горизонтальных колебаний при землетрясениях, как правило, превышают амплитуды вертикальных колебаний. Вместе с тем, в эпицентральных областях землетрясений могут наблюдаться сравнительно более высокие значения амплитуд вертикальных колебаний.

В качестве меры интенсивности сейсмических колебаний иногда указывается только их амплитуда, однако необходимо понимать, что частотный состав колебаний, а также длительность интенсивной фазы колебаний также могут оказывать существенное влияние на поведение зданий и сооружений при землетрясениях, определяя совокупный сейсмический эффект.

Во время развития разрыва очаг сильного землетрясения излучает довольно широкий спектр колебаний с периодами от десятков секунд до сотых долей секунды. При прохождении сейсмических волн через различные слои геологической среды их частотный состав претерпевает изменения: какие-то гармоники затухают, какие-то, наоборот, усиливаются. В том числе спектральный состав сейсмических воздействий зависит от амплитудно-частотных характеристик грунтовых оснований и может вести к существенному усилению колебаний зданий и сооружений. Заметим, что наиболее опасными для многих зданий и сооружений являются колебания с периодами от 0,1 до 2 секунд, поскольку именно в этом диапазоне находятся периоды собственных колебаний большинства современных строительных объектов.

Следует отметить, что акселерограммы землетрясений представляют особую ценность для совершенствования методов расчета сейсмостойких зданий и сооружений. Особенно это отно-

сится к записям реальных землетрясений, полученным в том же регионе, где осуществляется проектирование и строительство.

Кроме реальных акселерограмм для динамических расчетов сооружений в настоящее время широко применяются так называемые *синтетические акселерограммы*, которые могут генерироваться (синтезироваться) с помощью соответствующего программного обеспечения на основе региональных и локальных данных, отражающих сеймотектоническую и инженерно-сейсмологическую ситуацию в районе строительства.

1.7. Измерение силы землетрясений

Говоря о силе землетрясения, важно различать два параметра – *магнитуду* (M), которая является энергетической характеристикой самого источника (очага землетрясения), и *сейсмическую интенсивность* (I), которая характеризует локальный сейсмический эффект от этого землетрясения в разных точках наблюдения. Каждое землетрясение (точнее его очаг) характеризуется одним значением магнитуды, тогда как множество значений интенсивности на поверхности земли меняется от точки к точке (в зависимости от расстояния до очага и местных инженерно-геологических условий).

Магнитуда землетрясения

Магнитуда (от английского *magnitude* – «величина», «размер») представляет собой количественную меру энергии, выделяющейся при землетрясении. Это безразмерная величина, помогающая сравнивать между собой и классифицировать различные сейсмические события. Значения магнитуд вычисляются по результатам измерения колебаний, зарегистрированных сейсмическими станциями.

Впервые понятие «магнитуды» было введено в 30-х годах двадцатого столетия американским сейсмологом Чарльзом Рихтером для классификации силы (размера) землетрясений. Для количественного определения так называемой локальной магни-

туды (M_L) использовался десятичный логарифм амплитуды (A), измеренной на сейсмограмме, полученной с помощью стандартного сейсмографа, которая затем приводилась к стандартному расстоянию с помощью корректирующей функции в зависимости от расстояния (Δ) от места расположения сейсмографа до эпицентра:

$$M_L = \lg A + f(\Delta)$$

Широко известная шкала магнитуд «по Рихтеру» имеет, однако, ограничения и, в частности, не обладает достаточной точностью при характеристике крупных землетрясений ($M \geq 6,5$). Поэтому к настоящему времени в мировой сейсмологической практике разработаны и используются также и другие типы магнитуд, которые различаются способом определения. Среди наиболее известных типов магнитуд отметим, в частности, магнитуды по поверхностным волнам (M_s), магнитуды по объемным волнам (m_b), магнитуды по сейсмическому моменту (M_w) (см., например, Lay & Wallace, 1995).

Кроме магнитуд, для сравнительной характеристики очагов землетрясений, используется также понятие «энергетического класса» (Раутиан, 1969), определяемого как десятичный логарифм энергии (в джоулях), высвобожденной в очаге землетрясения. Для связи между энергетическим классом и магнитудой землетрясений разработаны региональные соотношения. Надо отметить, однако, что энергетический класс более подходит для описания землетрясений слабой и средней силы, поэтому сильные землетрясения все же лучше характеризовать в значениях магнитуды.

Использование различных подходов к определению силы землетрясений приводит к тому, что оценки различных типов магнитуд одного и того же события могут не совпадать. Особенно заметная разница наблюдается при оценке магнитуды крупных землетрясений (см. *Рис. 1.10*, Idriss, 1985, Heaton, 1986).

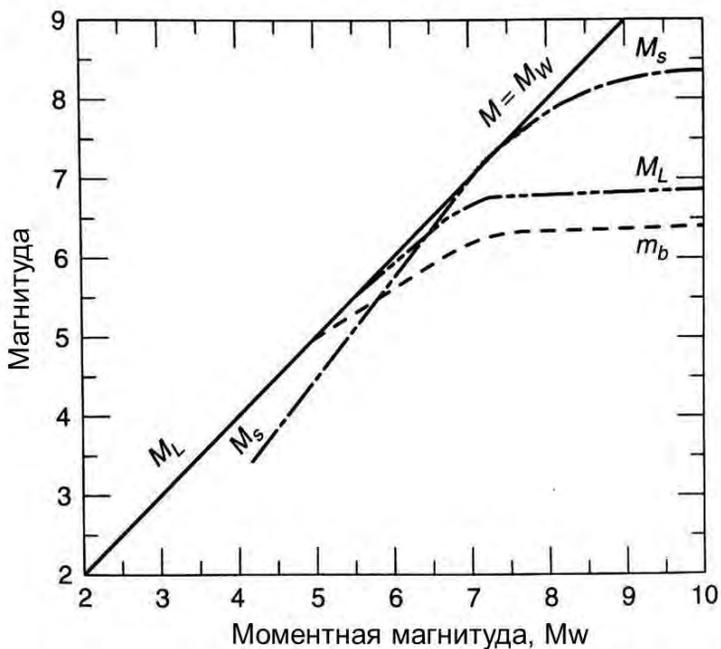


Рис. 1.10. Соотношения между различными шкалами магнитуд

Как видно из рис.1.10, при крупных землетрясениях для большинства шкал магнитуд (кроме M_w) наступает *насыщение*, что влияет на точность количественных оценок. Вследствие этого, в современной сейсмологической практике существует выраженная тенденция предпочтительного использования магнитуды по сейсмическому моменту, хотя в настоящее время, в научно-технической литературе, продолжают использоваться различные из вышеперечисленных энергетических характеристик землетрясений. В расчетах сейсмического момента учитываются упругие характеристики горных пород, площадь зоны разрыва и амплитуда смещения (Канатогі, 1977). Поэтому моментная магнитуда (M_w) считается физически более обоснованной для количественной оценки самых сильных сейсмических событий.

Магнитуда является энергетической характеристикой очага землетрясения, показывая количество выделяемой энергии при разрушении горных пород (Gutenberg and Richter, 1956). Для при-

ближенного определения количества энергии E (в эргах), выделяемой при землетрясении, можно воспользоваться следующим соотношением:

$$\lg E = 1,5 * M + 11,8.$$

Чем сильнее землетрясение, тем больше выделяемая энергия и, соответственно, тем выше его магнитуда. Увеличение магнитуды на единицу соответствует увеличению амплитуды колебаний в 10 раз и увеличению энергии в очаге примерно в 32 раза, а увеличение магнитуды на две единицы соответствует увеличению энергии примерно в 1000 раз.

Отметим, что шкала магнитуд не имеет строго определенного ограничения ни снизу, ни сверху. Говоря о нижнем пределе, подчеркнем, что современная высокочувствительная сейсмометрическая аппаратура позволяет регистрировать очень слабые землетрясения, которые характеризуются не только нулевой, но даже и отрицательной магнитудой. Что касается верхнего предела магнитуд, сильнейшее из ныне известных землетрясений имело магнитуду 9,5, но теоретически возможны землетрясения и с большей магнитудой. Поэтому шкалу магнитуд называют «открытой».

Сейсмическая интенсивность

Если магнитуда и энергия характеризуют силу сейсмического события в самом очаге землетрясения, то сейсмическая интенсивность является мерой проявления эффекта землетрясения в различных точках поверхности земли, находящихся на различном удалении от очага (*Рис. 1.11*). Сейсмическая интенсивность часто используется в качестве количественной меры опасности при оценке сейсмической опасности и сейсмическому районированию территорий.

Для количественного измерения сейсмической интенсивности существуют соответствующие шкалы, которые позволяют сравнивать и классифицировать уровень локального сейсмического эффекта, наблюдаемого в разных точках поверхности

земли. Отметим, что при оценке сейсмической интенсивности используются два принципиально различающихся подхода: *макросейсмический и инструментальный*.

Макросеймикой называется раздел инженерной сейсмологии, изучающий проявление различных сейсмических эффектов на поверхности земли, наблюдаемых при землетрясениях. Соответственно, макросейсмические шкалы предназначены для количественной оценки этих эффектов, основываясь на описании и сравнении разрушительных эффектов землетрясения.

По данным макросейсмических исследований (которые включают в себя, в частности, результаты анкетирования населения, результаты обследования состояния различных типов зданий на различных участках территории подвергшейся землетрясению) оценивается сейсмическая интенсивность и картируется ее пространственное распределение.

Количественная оценка уровня интенсивности определяется по комплексу рассматриваемых признаков (эффектов) с помощью макросейсмических шкал, исходя из обобщенного описания реакции людей и окружающих их предметов, поведения зданий и сооружений, а также сопутствующих природных явлений. Интенсивность оценивается в баллах макросейсмической шкалы, поэтому иногда, говоря об интенсивности, используют термин «*балльность*».

Отметим, что в настоящее время в мировой практике наибольшее распространение получили 12-балльные шкалы, то есть весь мыслимый диапазон интенсивности сейсмических колебаний (от неощутимых до катастрофических) делится на двенадцать ступеней (баллов). Более подробно макросейсмические шкалы будут рассмотрены в следующей главе.

На исследуемой после землетрясения территории выделяются зоны, соответствующие различному уровню интенсивности, которые оконтуриваются с помощью *изосейст* (линий равного уровня интенсивности). Область наибольших сотрясений называют *плейстосейстовой*. Говоря об оценках интенсивности, получаемых с помощью макросейсмических шкал, их часто на-

зывают также *макросейсмической интенсивностью*, а поле изо-сейст, отображающее пространственный эффект воздействия землетрясения, называют *макросейсмическим полем*.

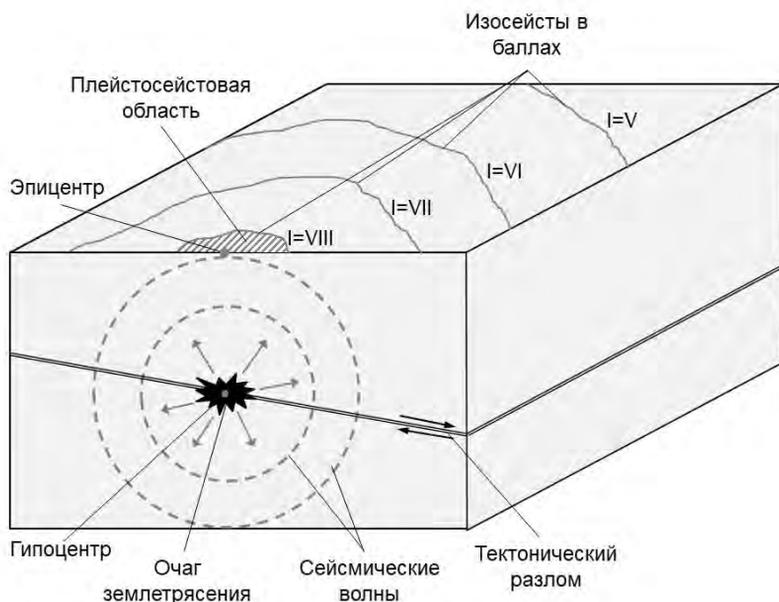


Рис.1.11. Очаг землетрясения и поле изосейст

Что касается инструментального подхода, как можно понять из названия, инструментальные шкалы построены на классификации параметров сейсмических колебаний, зарегистрированных с помощью соответствующих сейсмометрических инструментов.

Новые подходы, связанные с разработкой инструментальных шкал интенсивности, появились с развитием эры инструментальной сейсмологии. Полученные с помощью современных инструментов параметры движений грунта (такие как амплитуда, спектральный состав, длительность колебаний) помогают количественно оценить уровень сейсмических воздействий. Анализ и сопоставление инструментальных данных, полученных при землетрясениях различной силы, с макросейсмическими оценками интенсивности позволяет вывести корреляционные зависимости

между уровнем макросейсмической балльности и параметрами колебаний.

В Таблице 1.1 показаны соотношения, демонстрирующие связь между оценками интенсивности и амплитудными параметрами сейсмических колебаний. Следует иметь в виду, что помимо амплитуды существенный вклад в совокупный сейсмический эффект могут вносить спектральный состав и длительность основной фазы колебаний. Поэтому представленные интервальные оценки имеют весьма значительный разброс.

Таблица 1.1

Корреляционные зависимости между интенсивностью и амплитудными параметрами сейсмических колебаний

Интенсивность (баллы)	Амплитуды ускорений при периоде колебаний 0,1 с и более (см/с ²)	Амплитуды скоростей (см/с)	Амплитуды смещений (см)
6	25–50	2–4	1–2
7	50–100	4–8	2–4
8	100–200	8–16	4–8
9	200–400	16–32	8–16
10	400–800	32–64	16–32

Более широкому распространению инструментального подхода на практике препятствует недостаточная повсеместная оснащенность сейсмически опасных территорий необходимыми инструментами. Поэтому основным методом оценки сейсмической интенсивности в большинстве стран все же остается подход, основанный на макросейсмических исследованиях.

Говоря о взаимосвязи характеристик землетрясения, подчеркнем, что уровень сейсмической интенсивности напрямую зависит от величины магнитуды. При прочих равных условиях, чем выше магнитуда, тем выше интенсивность сейсмических колебаний. Однако с увеличением глубины очага уровень интенсивности на поверхности земли уменьшается. В Таблице 1.2 показана

ны оценки соотношения магнитуды и балльности при различных глубинах очага землетрясения (Уломов, <http://seismos-u.ifz.ru>).

Таблица 1.2

**Примерное соотношение магнитуды и балльности
в зависимости от глубины очага землетрясения**

Глубина (км)	Магнитуда			
	5	6	7	8
10	VII	VIII–IX	X	XI–XII
20	VI	VII–VIII	IX	X–XI
40	V	VI–VII	VIII	IX–X

Зависимость интенсивности сейсмических колебаний от магнитуды подтверждается как макросейсмическими исследованиями, так и инструментальными данными.

В качестве примера на рис.1.12 показаны акселерограммы, зарегистрированные при землетрясениях различной магнитуды.

Важно отметить, что с увеличением магнитуды землетрясений наблюдается не только увеличение амплитудных значений колебаний, но также заметно изменяется их спектральный состав, в целом сдвигаясь в низкочастотную область, а кроме того существенно увеличивается длительность основной фазы колебаний.

При этом необходимо понимать, что интенсивность, будучи эффектом проявления сейсмических волн в различных точках поверхности земли, зависит не только от магнитуды. Среди совокупности факторов, которые могут оказывать существенное влияние на уровень сейсмического эффекта, в качестве основных, помимо магнитуды и глубины очага, отметим также удаленность от очага и локальные грунтовые условия площадки наблюдения.

Наибольший уровень сейсмической интенсивности наблюдается, как правило, в эпицентральной зоне землетрясения (соответственно, эта интенсивность называется эпицентральной). Размеры эпицентральной зоны зависят от размеров очага землетрясения. С удалением от очага, благодаря диссипации (рассеянию) энергии сейсмических волн, в целом, наблюдается затухание интенсивности.

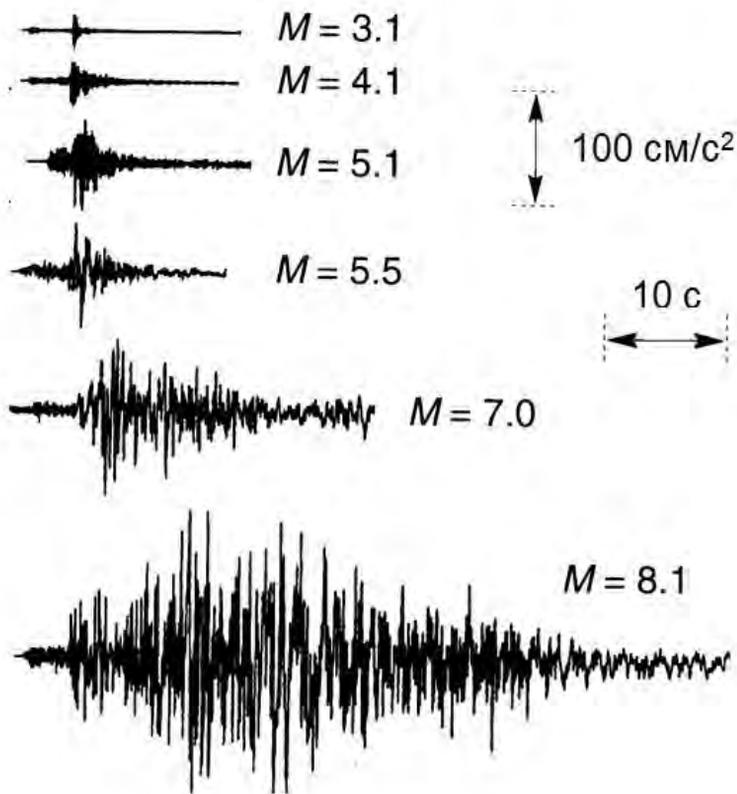


Рис. 1.12. Акселерограммы землетрясений различной магнитуды

Для описания законов затухания сейсмической интенсивности с расстоянием сейсмологами разработаны специальные соотношения, которые, как правило, определяются региональными особенностями территорий.

В качестве примера на рис. 1.13 показаны графики затухания интенсивности (в баллах) с расстоянием (в км) при землетрясениях различной магнитуды (Уломов, <http://seismos-u.ifz.ru>).

Подобные соотношения, связывающие затухание интенсивности (или параметров сейсмических колебаний) с расстоянием, как правило, имеют региональную привязку, и они широко используются при оценке сейсмической опасности территорий.

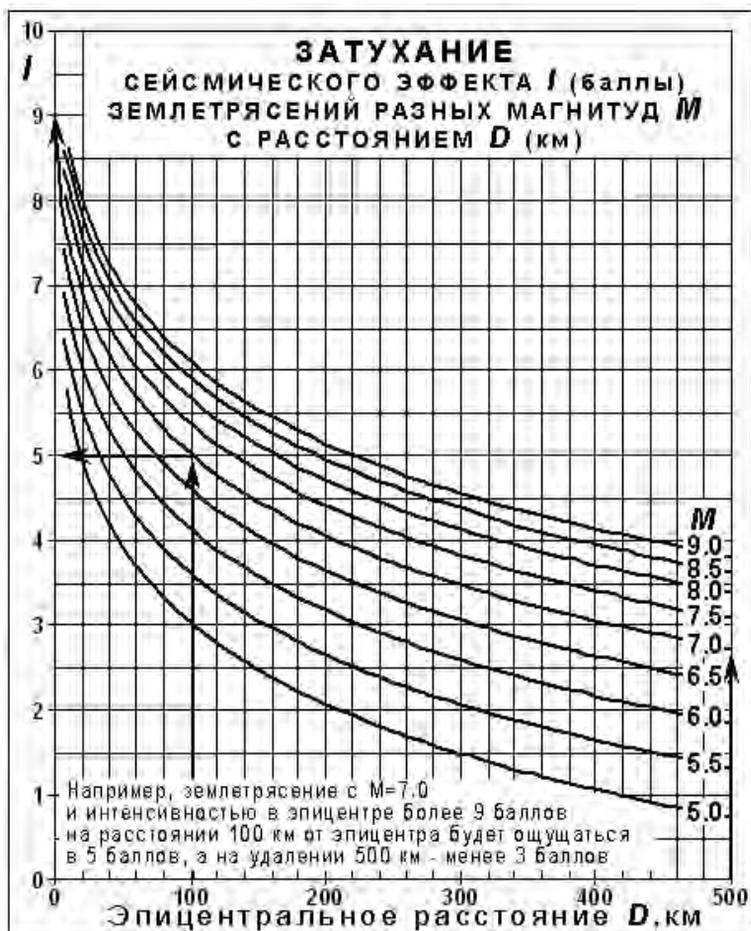


Рис. 1.13. Затухание интенсивности с удалением от эпицентра

1.8. Статистика землетрясений и наиболее известные землетрясения

Ежедневно на земном шаре происходят тысячи землетрясений, а ежегодное их количество исчисляется многими сотнями тысяч. Понятно, что в общее число землетрясений включены как сильные, так и слабые события. В таблице 1.3 показана среднегодовая частота возникновения землетрясений различной силы

во всем мире (по данным Геологической службы США, USGS). Представленная в этой таблице статистическая информация основана на наблюдениях, начиная с 1900 года.

Таблица 1.3:

Частота возникновения землетрясений различной силы

Землетрясение	Магнитуда	Среднее число событий в год
Катастрофическое	8 и выше	1
Разрушительное	7 – 7.9	17
Сильное	6 – 6.9	134
Умеренное	5 – 5.9	1 319
Слабое	4 – 4.9	примерно 13 000
Незначительное	3 – 3.9	примерно 130 000
Очень слабое	2 – 2.9	примерно 1 300 000

Частотный список событий в представленной таблице отсортирован по величине их магнитуды, которая является основной характеристикой каждого землетрясения и количественной мерой его величины (силы).

На Рис. 1.14 среднестатистическая информация о ежегодном количестве землетрясений различной магнитуды представлена в графическом изображении (с использованием дополненных данных, представленных на сайте Консорциума сейсмологических институтов, IRIS). Вертикальная шкала слева показывает значения магнитуд. Справа для сравнения показана энергетическая шкала, показывающая оценки энергии, выделяемой при землетрясениях. Кроме того на графике показано сравнение с другими известными событиями, вызванными различными причинами другой природы, но эквивалентными в энергетическом выражении. Представленный график имеет явно нелинейный характер, подчеркивающий, что с увеличением силы землетрясений их ежегодное количество заметно уменьшается.

Подавляющее большинство сейсмических событий (благодаря тому, что они имеют весьма малую магнитуду или происходят в отдаленных районах Земли) для людей остаются незамеченными и только малая их часть может представлять угрозу для человеческой жизнедеятельности.



Рис. 1.14. Среднестатистическая информация о землетрясениях

Слабые сотрясения, не представляющие опасности для зданий и сооружений, нередки и они привычны для людей, живущих в сейсмически активных районах. Сильные и разрушительные землетрясения происходят гораздо реже. Однако стихийная и разрушительная мощь этих статистически редких событий настолько велика, что может привести к катастрофическим последствиям, особенно если общество в полной мере не осознает уровень сейсмического риска и не подготовлено к существующей угрозе.

В таблице 1.4 представлен ранжированный по магнитуде список самых сильных землетрясений, произошедших в различных регионах планеты за период наблюдений с 1900 года (по данным Геологической службы США, www.usgs.gov).

Наиболее сильным землетрясением в истории сейсмических наблюдений считается Великое Чилийское землетрясение, которое произошло 22 мая 1960 года на западном побережье Южной Америки, в Чили возле города Вальдивия (поэтому называемое также Вальдивским землетрясением). По разным оценкам моментная магнитуда этого землетрясения составляет от 9,4 до 9,6 (большинство ученых-сейсмологов склоняется к среднему значению – 9,5).

Сильнейшие землетрясения за период с 1900 г. (по данным USGS)

Землетрясение (включая место события и альтернативные варианты названия)	Дата	Магнитуды	Координаты эпицентра
1	2	3	4
Великое Чилийское землетрясение, Вальдивское землетрясение, Чили	22 мая 1960 г.	9.5	38.14° ю.ш., 73.41° з.д.
Великое Аляскинское землетрясение, залив Принца Уильяма, США	28 марта 1964 г.	9.2	60.91° с.ш., 147.34° з.д.
Землетрясение в Индийском океане возле Суматры, Индонезия	26 декабря 2004 г.	9.1	3.30° с.ш., 95.98° в.д.
Землетрясение Тохоку, Великое восточно-японское землетрясение, Япония	11 марта 2011 г.	9.1	38.30° с.ш., 142.37° в.д.
Землетрясение на Камчатке, Россия	4 ноября 1952 г.	9.0	52.62° с.ш., 159.78° в.д.
Землетрясение у побережья Чили, в регионе Мауле, Чили	27 февраля 2010 г.	8.8	36.12° ю.ш., 72.90° з.д.
Землетрясение у побережья Эквадора, эквадорско-колумбийское землетрясение	31 января 1906 г.	8.8	0.96° с.ш., 79.37° з.д.
Землетрясение на Крысьих островах в Алеутском архипелаге, Аляска, США	4 февраля 1965 г.	8.7	51.25° с.ш., 178.72° в.д.
Землетрясение на Ниасе, Землетрясение на Северной Суматре, Индонезия	28 марта 2005 г.	8.6	2.09° с.ш., 97.11° в.д.
Ассамское землетрясение, Ассамско-Тибетское землетрясение, Гималаи	15 августа 1950 г.	8.6	28.36° с.ш., 96.45° в.д.
Землетрясение у западного побережья Северной Суматры, Индонезия	11 апреля 2012 г.	8.6	2.33° с.ш., 93.06° в.д.

продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4
Землетрясение на Андреяновских островах в Алеутском архипелаге, Аляска, США	9 марта 1957 г.	8.6	51.50° с.ш., 175.63° з.д.
Землетрясение у Алеутских островов южнее острова Уникама, Аляска, США	1 апреля 1946 г.	8.6	53.49° с.ш., 162.83° з.д.
Землетрясение в море Банда, Индонезия	1 февраля 1938 г.	8.5	5.05° ю.ш., 131.61° в.д.
Валленарское землетрясение на границе Чили и Аргентины, Атакама, Чили	11 ноября 1922 г.	8.5	28.29° ю.ш., 69.85° з.д.
Землетрясение на Курильских островах, Россия	13 октября 1963 г.	8.5	44.87° с.ш., 149.48° в.д.
Землетрясение на Камчатке, Россия	3 февраля 1923 г.	8.4	54.49° с.ш., 160.47° в.д.
Землетрясение в Южной Суматре	12 сентября 2007 г.	8.4	4.44° ю.ш., 101.37° в.д.
Землетрясение в Перу	23 июня 2001 г.	8.4	16.27° ю.ш., 73.64° з.д.
Землетрясение в Санрику, Япония	2 марта 1933 г.	8.4	39.21° с.ш., 144.59° в.д.

Колебания, вызванные этим глобальным сейсмическим событием, были зарегистрированы сейсмостанциями в различных точках земного шара, причем интенсивность колебаний была настолько высока, что многие сейсмографы просто зашкаливали. Это была невиданная по энергетической силе тектоническая катастрофа. Зона образовавшегося разлома достигала 1000 км, вызывая сотрясения, которые охватили большую часть площади Чили, разрушая города и населенные пункты. Кроме того, это землетрясение сопровождалось мощным цунами, волны которого затронули побережье многих стран Тихоокеанского бассейна, причиняя ущерб и унося человеческие жизни.

По оценкам американских исследователей (Talley & Cloud, 1962), суммарный материальный ущерб от Вальдивского земле-

трясения превысил полмиллиарда долларов США (в ценах тех лет). При этом землетрясении погибло более двух тысяч человек, более трех тысяч было ранено и более двух миллионов человек осталось без крова. Помимо этого сотни человек погибли в результате цунами. Это, безусловно, очень серьезные потери, однако, сопоставляя колоссальную силу землетрясения и уровень причиненного ущерба, следует отметить, что, хотя Вальдивское землетрясение и является самым сильным, оно не было самым смертоносным из известных сейсмических катастроф.

В истории человечества известно много катастрофических землетрясений, которые унесли десятки и даже сотни тысяч жизней (*Табл. 1.5*).

Список наиболее смертоносных сейсмических событий возглавляет так называемое Великое Китайское землетрясение, которое произошло 23 января 1556 года в Китае, в провинции Шэньси. В китайских исторических летописях говорится, что во время этого землетрясения погибло 830 тысяч человек. Отмечается, что такие высокие оценки числа жертв включают в себя также и человеческие потери от голода и болезней после разрушительного воздействия землетрясения. По оценкам современных исследований, основанных на геолого-тектонических данных, магнитуда этого землетрясения составляла примерно 8.

Второе место среди печально известных сейсмических катастроф занимает Таншаньское землетрясение, которое также произошло на территории Китая, в городе Таншань 27 июля 1976 года. Магнитуда землетрясения составила 7,5. По официальным данным властей Китая, общее количество погибших при этом землетрясении составило примерно 242 тысячи человек.

Высокий уровень человеческих потерь при этих двух разрушительных землетрясениях можно объяснить несколькими схожими причинами. Во-первых, как известно, территория Китая всегда отличалась очень высокой плотностью населения. Во-вторых, в отличие от Чилийского землетрясения, которое произошло в дневное время, оба вышеописанных китайских землетрясения произошли в ночные часы, когда большинство людей находились в своих жилищах. В-третьих, судя по большому

количеству разрушений, жилые постройки тех лет были весьма уязвимы и неспособны выдержать сильные сейсмические колебания.

Особое место среди природных катастроф XXI века занимает землетрясение, произошедшее 26 декабря 2004 года у северо-западного побережья индонезийского острова Суматра. Это не только одно из сильнейших землетрясений за всю историю наблюдений, но и одно из самых смертоносных, поэтому это событие представлено как в таблице 1.4, так и в таблице 1.5.

Таблица 1.5:

Наиболее смертоносные известные землетрясения

Место	Дата	Магнитуда	Оценки числа погибших (тыс.)
Шэньси, Китай	23 января 1556 г.	~ 8	830
Таншань, Китай	27 июля 1976 г.	7,5	Более 240
Алеппо, Сирия	9 августа 1138 г.	Нет данных	230
Индийский океан, Суматра, Индонезия	26 декабря 2004 г.	9,1	228
Дамган, Иран	22 декабря 856 г.	Нет данных	200
Ганьсу, Хайюань, Китай	16 декабря 1920 г.	7,8	200
Ардабил, Иран	23 марта 893 г.	Нет данных	150
Канто, Япония	1 сентября 1923 г.	7,9	142
Ашхабад, Туркменистан	6 октября 1948 г.	7,3	Более 100
Китай	27 сентября 1290 г.	Нет данных	100
Сычуань, Китай	12 мая 2008 г.	7,9	88
Кашмир, Пакистан	8 октября 2005 г.	7,6	86

Отличительной чертой этой катастрофы является то, что большая часть погибших являлись жертвами гигантского цунами, вызванного этим землетрясением. По числу жертв это страшное цунами занимает первое место в истории. Крупномасштабное стихийное бедствие привело к гибели людей не только в странах Юго-Восточной Азии, но также и во многих странах на западном побережье Африки.

В таблице 1.5 представлены также некоторые другие известные сейсмические события приведшие к многочисленным жертвам.

Следует учитывать, что для многих исторических землетрясений, для которых существует только фрагментарная описательная информация, очень трудно получить точные оценки, имея в виду, как определение силы землетрясения, так и количественную оценку его последствий. Поэтому многие из представленных в таблице значений, полученные из различных источников, следует рассматривать как оценочные цифры, которые исследователи пытаются уточнить вплоть до настоящего времени (см., например, Musson, 2021).

Важно отметить, что для многих из перечисленных катастрофических землетрясений значительный урон был вызван возникновением сопутствующих явлений (таких как цунами, оползни, пожары и др.), для которых землетрясения часто являются триггером. В сейсмической истории планеты известны многие случаи, когда подобные сопутствующие эффекты землетрясений причиняли больший ущерб, нежели сами сейсмические колебания. Кроме этого, необходимо понимать, что общее количество жертв при стихийных бедствиях может значительно вырасти при отсутствии или задержке спасательных мероприятий, а также вследствие дополнительного воздействия таких неблагоприятных факторов как, например, холод, голод, болезни.

Сопоставление сейсмических событий, представленных в таблицах 1.4 и 1.5 наглядно подчеркивает тот факт, что далеко не

всегда самые сильные землетрясения причиняют наибольший ущерб. Достаточно очевидно, что если сильное землетрясение происходит в пустынной или малонаселенной местности, оно не вызовет такие катастрофические последствия, какие может причинить землетрясение такой же силы, но произошедшее на густонаселенной территории. Это объясняется тем, что уровень потерь (уровень риска) обусловлен не только силой землетрясения (уровнем опасности), но также и, в весьма значительной мере, такими факторами как подверженность и уязвимость объектов риска, включая плотность населения и концентрацию материальных ценностей, а также особенности местной застройки (в первую очередь ее сейсмостойкость или уязвимость). Эти составные факторы лежат в основе концепции сейсмического риска и будут более подробно рассмотрены в следующих главах.

1.9. Самые известные землетрясения на территории Туркменистана

Территория Туркменистана является одной из наиболее сейсмоопасных не только в Центральной Азии, но и во всем мире. Высокая сейсмическая активность в регионе во многом объясняется коллизией Аравийской и Евразийской тектонических плит (см. *Рис.1.2*). В рамках сейсмического мониторинга, проводимого сейсмологами страны, на территории Туркменистана ежегодно регистрируются тысячи сейсмических событий различной силы (Сарыева и др., 2019, 2020).

Наиболее известные разрушительные землетрясения, произошедшие на территории Туркменистана, представлены в таблице 1.6, а на *рис.1.15* показана карта изосейст сильнейших землетрясений (с $M \geq 6$), разработанная Институтом сейсмологии и физики атмосферы (ИСФА) Академии наук Туркменистана (Петрова, 2009).

**Разрушительные землетрясения
на территории Туркменистана**

Землетрясение	Дата события	Магнитуда	Примечания
Ак-Тепинское	2000 г. до н.э.	$M = 7,1$	по раскопкам
Первое Нисское	10 г.	$M = 7,1$	В эпицентре IX–X баллов
Второе Нисское	943 г.	$M = 7,1$	В эпицентре IX–X баллов
Кушкинское	1139 г.	$M = 7,0$	В эпицентре IX баллов
Керкинское	1175 г.	$M = 7,1$	В эпицентре IX–X баллов
Амударьинское	1208 г.	$M = 6,1$	В эпицентре VIII–IX баллов
Красноводское (Узун-Адинское)	08.07.1895 г.	$M = 8,2$	В эпицентре IX–X баллов
Гермабское	01.05.1929 г.	$M = 7,2$	В эпицентре IX баллов
Казанджикское	04.11.1946 г.	$M = 7,0$	В эпицентре IX баллов
Ашхабадское	05.10.1948 г.	$M = 7,3$	В эпицентре IX–X баллов
Кумдагское	14.03.1983 г.	$M = 5,7$	В эпицентре VIII баллов
Бурунское	22.02.1984 г.	$M = 5,9$	В эпицентре VIII баллов
Балханское	06.12.2000 г.	$M = 7,3$	В эпицентре VIII–IX баллов

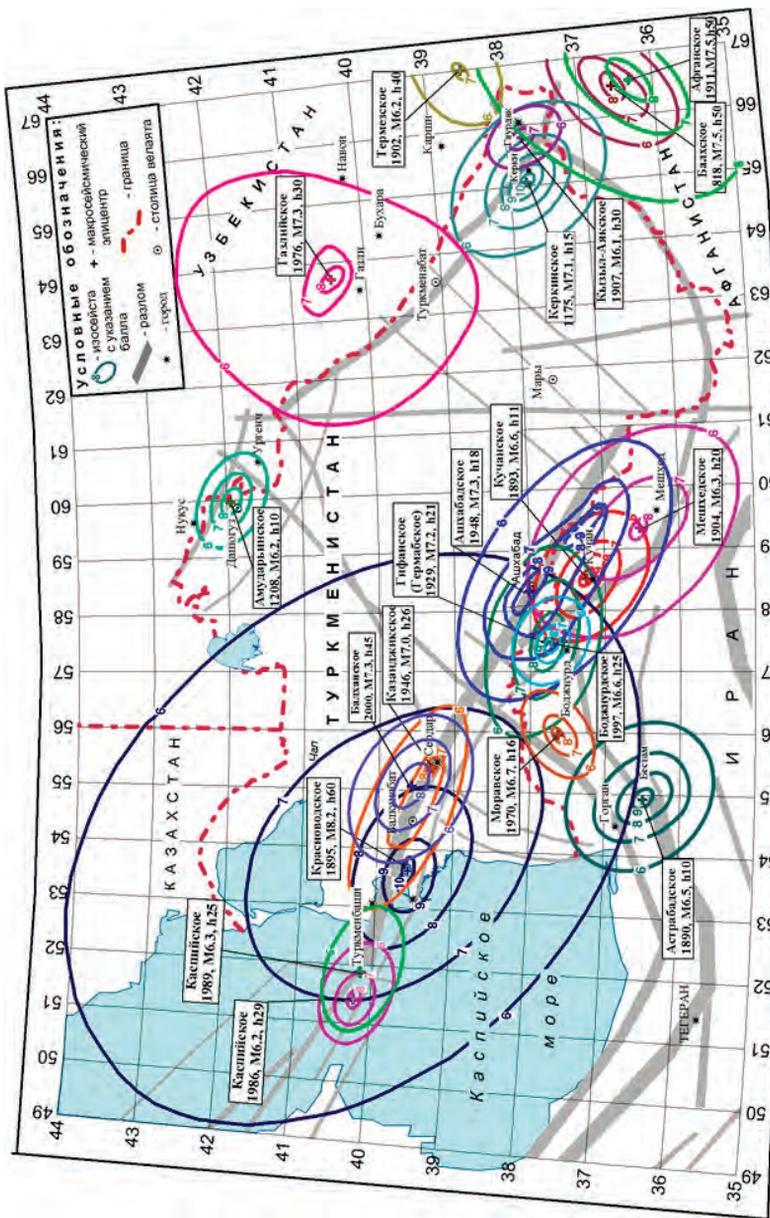


Рис.1. 15. Карта изосейст сильнейших землетрясений на территории Туркменистана (ИСФА)

Первым в списке известных разрушительных землетрясений на территории Туркменистана представлено Ак-Тепинское землетрясение, признаки которого были обнаружены во время археологических раскопок, проводившихся в 1930–1931 гг. близ селения Ак-Тепе у подножия Копетдага. По оценкам, специалистов (Рустанович, 1967) это землетрясение произошло около 2000 лет до нашей эры и имело магнитуду 7.1. Интенсивность сотрясений в эпицентре оценивается в IX–X баллов. При этом землетрясении были полностью разрушены несколько древних селений, располагавшихся в районе современного Ашхабада (Аширов и др., 1993). Разрушительные землетрясения, сопоставимые по силе с Ак-Тепинским и приуроченные к тому же историческому району, неоднократно происходили и в последующие столетия, в частности, Нисские землетрясения, происшедшие в первом и десятом веках нашей эры и упоминаемые в исторических документах. Расчеты, выполненные на основе данных полевых исследований и исторических сведений, показывают подобие механизма и параметров этих землетрясений (Каррыев, 1995).

Сильнейшее из известных землетрясений на территории Туркменистана произошло в ночь с 8 на 9 июля 1895 года в районе города Красноводск (ныне Туркменбаши). Красноводское землетрясение вызвало сотрясения, ощущавшиеся на огромной площади, и сопровождалось значительными деформациями на поверхности земли. Магнитуда события оценивается на уровне 8.2, эпицентральная интенсивность достигала IX–X баллов. Несмотря на силу этого землетрясения, сведений о человеческих жертвах нет, что, вероятно, можно объяснить малонаселенностью района в те годы (Каррыев, 1995).

Самой страшной сейсмической катастрофой в истории туркменского народа явилось Ашхабадское землетрясение, которое произошло в ночь с 5 на 6 октября 1948 года. Его магнитуда составила 7,3, а интенсивность в эпицентре достигала IX–X баллов. Это землетрясение считается одним из самых смертоносных сейсмических событий в истории человечества (см. табл. 1.5). Его очаг зародился в той же очаговой зоне, где произошли Ак-

Тепинское и Нисские землетрясения. К середине XX века на этой территории уже вырос многонаселенный город, но, к несчастью, в то время реальная сейсмическая опасность территории была явно недооценена и большая часть городской застройки не была рассчитана на такие сильные воздействия. Обвальное обрушение уязвимых зданий под воздействием мощных подземных толчков, произошедших в те минуты, когда город спал, привело к столь трагическим последствиям.

Более подробную информацию об этом и других сейсмических событиях, происходивших на территории Туркменистана, в том числе параметры землетрясений и описание их последствий, включая рассказы очевидцев, можно найти в многочисленных статьях и книгах, опубликованных специалистами (см., например, Горшков, 1947, 1949, Оразымбетов и др., 1960, Рустанович, 1967, Клычмурадов, 1977, Наливкин, 1989, Аширов и др., 1993, Каррыев и др., 1994, Каррыев, 1995, 2017, Каррыев, Эсенов, 2018, Никонов, 2018).

Вопросы для самоконтроля по первой главе

1. Что такое землетрясение?
2. Какие причины землетрясений вы знаете?
3. Как возникают тектонические землетрясения?
4. Что такое очаг, гипоцентр, эпицентр землетрясения?
5. Что такое форшоки, афтершоки, рои землетрясений?
6. Какие типы сейсмических волн вы знаете?
7. Как распространяются различные типы сейсмических волн?
8. Что такое акселерограмма, велосигграмма, сейсмограмма?
9. Что характеризует магнитуда землетрясения?
10. Что такое сейсмическая интенсивность и от чего она зависит?
11. Какое самое сильное известное землетрясение в мире?
12. Когда произошло самое сильное известное землетрясение на территории Туркменистана?
13. Почему самые сильные землетрясения не всегда самые смертоносные?

II ГЛАВА СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ

2.1. Сейсмическая опасность и эффекты землетрясений

Проживая на сейсмически опасных территориях, человечество научилось понимать, что землетрясения неизбежны и, вместе с тем, непредсказуемы. Поскольку предотвратить или снизить уровень опасности, определяемый стихийной природой землетрясений, невозможно, необходимо адекватно и всесторонне оценивать потенциал существующей угрозы, ее вероятное проявление и воздействие на объекты жизнедеятельности человека.

Сейсмическая опасность является одним из основных факторов, определяющих количественный уровень сейсмического риска. По определению сейсмическая опасность – это угроза возникновения сейсмических воздействий на рассматриваемой территории. Ее проявление связано с вероятными сотрясениями поверхности грунта и другими сопутствующими эффектами, вызываемыми землетрясениями.

Среди основных факторов, определяющих уровень сейсмической опасности и проявление поверхностных сейсмических эффектов, можно назвать сеймотектонические условия района, а также параметры очагов землетрясений и, в первую очередь, их магнитуду. Как уже отмечалось ранее, между магнитудой землетрясения и сейсмической интенсивностью существует прямо пропорциональная зависимость. Чем крупнее землетрясения и чем выше его магнитуда, тем на большей территории оно ощущается, тем выше интенсивность колебаний и тем вероятнее проявление вторичных эффектов.

Кроме магнитуды и размеров очага следует отметить, что механизм очага также оказывает влияние на проявление сейсмических эффектов, определяя, в частности, спектральный состав колебаний и их пространственную ориентацию.

Уровень опасности определяется также условиями распространения и затухания сейсмических волн, что включает в себя как свойства геологической среды, так и расстояние от очага землетрясения, по мере удаления от которого сейсмическая опасность, как правило, уменьшается. Хотя, как показывают наблюдения, усиление сейсмических эффектов может наблюдаться и на дальних расстояниях за счет местных геологических и инженерно-геологических условий.

Как показывает опыт сильных землетрясений, сейсмические явления и эффекты (как первичные, так и вторичные) могут проявляться самым разнообразным образом. Представляя опасность для жизнедеятельности человека, они могут быть довольно разнообразны по механизму своего воздействия на окружающую среду.

Помимо сейсмических колебаний, которые являются наиболее известным проявлением сейсмических событий, при сильных землетрясениях нередко наблюдаются другие эффекты. Например, такие явления, как выход тектонического разрыва на дневную поверхность, потеря несущей способности грунтов, оползни, обвалы и им подобные склоновые явления, цунами, пожары и другие сопутствующие явления, которые могут вносить существенный вклад в губительные последствия подземной стихии, часто многократно умножая совокупный ущерб.

Ниже рассмотрим некоторые примеры проявления наиболее распространенных сейсмических эффектов и механизм их воздействия на здания и сооружения.

Сейсмические колебания

Основным, наиболее распространенным и широко известным эффектом землетрясений является возникновение колебаний под действием сейсмических волн, достигших поверхности земли. Под воздействием сильных колебательных движений оснований зданий и сооружений, в их несущих конструкциях возникают силы инерции, которые могут привести к повреждениям или даже полному разрушению этих объектов.

Надо подчеркнуть, что большинство строительных объектов рассчитаны на восприятие разнообразных статических нагрузок, которые прикладываются к конструкциям постепенно и направлены, как правило, вертикально.

В отличие от них, сейсмические нагрузки являются гораздо более коварными, что выражается, с одной стороны, в динамическом (быстро изменяющемся) характере приложения нагрузок, а с другой стороны, в их разнонаправленности, то есть возникающие силы инерции могут иметь различное направление в пространстве, в том числе, наиболее часто, горизонтальное. (Здесь можно провести параллели с хорошо известным эффектом резко трогającego или тормозящего транспорта, который заставляет находящихся в нем пассажиров терять равновесие).

Интенсивность сейсмических колебаний может усиливаться за счет локальных грунтовых условий, особенно в случае возникновения резонансных эффектов в системе «грунт-сооружение», то есть характер воздействия сейсмических колебаний на здания и сооружения в значительной степени определяется не только амплитудой колебаний, но также и соотношением периода собственных колебаний сооружений с периодами колебаний грунта. Чем ближе совпадают эти периоды, тем сильнее резонансные колебания сооружений (резкое возрастание амплитуды колебаний), тем большую опасность представляют эти колебания для сооружений.

Степень возможного повреждения зависит как от интенсивности сейсмических колебаний, так и от конструктивных особенностей зданий, определяющих их сейсмическую уязвимость. При этом в конструкциях зданий могут возникать как легкие повреждения, которые устранимы с помощью простого ремонта, так и очень тяжелые, вплоть до полного разрушения зданий, которые не подлежат восстановлению.

На рис.2.1 (фото Г.Тидеманн, EMS-98) показан пример разрушения каркасных железобетонных зданий при землетрясении 7 декабря 1988 года в Армении, интенсивность сейсмических колебаний при котором достигала X баллов (Хачиян, 2018).



Рис. 2.1. Разрушение зданий, вызванное сейсмическими колебаниями (фото Г. Тидеманн)

Выход разрыва на поверхность

Эти нередко возникающие эффекты землетрясений (называемые также первичными сейсмодислокациями) обуславливаются сеймотектоническими условиями территории и особенностями очага землетрясения. Вероятность выхода тектонического разрыва на дневную поверхность определяется, в частности, глубиной очага и магнитудой землетрясения.

Выход очагового разрыва на дневную поверхность может быть сопряжен с тяжелыми повреждениями непосредственно на разрыве (Шебалин, 2003) в тех случаях, если верхняя кромка разрыва пересекает застроенную территорию. Возникающие трещины могут привести к серьезным локальным повреждениям фундаментов зданий и сооружений, подземных коммуникаций, нарушениям полотна улиц и дорог.

Особую опасность эти эффекты представляют для линейно протяженных объектов, таких, например, как трубопроводы,

железные дороги, автомагистрали и их инфраструктура. Соответственно, при проектировании и строительстве подобных объектов необходимо принимать во внимание расположение известных активных сеймотектонических разломов и вероятность возникновения сейсмических дислокаций.

На рис.2.2 (фото автора) показан пример выхода разрыва на поверхность при землетрясении 12 ноября 1999 года в Турции. Длина трещины, возникшей в результате сдвигового движения по Северо-Анатолийскому, разлому составила несколько десятков километров, протянувшись от города Дюздже по направлению к Мраморному морю при среднем смещении по разлому 3 м.

Отметим, что случаи выхода разрыва на дневную поверхность наблюдались и в Туркменистане, что представлено в описаниях некоторых сильных землетрясений, происходивших на территории страны (Каррыев, 1995).

Потеря несущей способности грунтов

При сильных землетрясениях в структурно-неустойчивых грунтах могут возникать значительные остаточные деформации, называемые также вторичными сейсмодислокациями или сейсмодеформациями (Штейнберг и др., 1993). Эти явления связаны с потерей несущей способности грунтов при интенсивных сейсмических воздействиях.

Вероятность проявления потери несущей способности грунтов определяется, с одной стороны, характеристиками внешнего воздействия (амплитуда, частота, продолжительность), а, с другой стороны, физико-механическими свойствами самих грунтов, причем во многих случаях в качестве критического фактора выступает их водонасыщение.

Примерами таких явлений, довольно часто наблюдаемых при сильных землетрясениях в различных районах мира, являются разжижение грунтов, процессы трещинообразования, а также сейсмопросадки в лессовых грунтах.



Рис. 2.2. Выход разрыва на дневную поверхность

Пожалуй, самым известным примером потери несущей способности грунтов при землетрясениях является разжижение. Так называется явление, при котором грунты ведут себя не как твердое тело, а как плотная жидкость (см., например, Иванов, 1978, Kramer, 1996, Ишихара, 2006, Idriss & Boulanger, 2008), в результате чего повреждаются здания, мосты, другие строительные объекты, расположенные на территориях, сложенных разжижаемыми грунтами.

Грунты, обладающие способностью разжижаться, называются тиксотропными (*тиксотропия* – способность вещества разжижаться под внешним воздействием, а затем снова затвердевать, восстанавливая свои механические связи после прекращения воздействия).

Механизм разжижения в водонасыщенных несвязных грунтах объясняется следующим образом. В состоянии покоя поровое пространство в грунтовой среде заполнено водой, при этом давление воды в порах уравнивается силами сцепления между зернами грунта. При динамическом возбуждении в порах возникает избыточное поровое давление, следствием чего является разрыв недостаточно прочных связей между частицами грунта. При этом высвобождается вода, заполнявшая пространство между зернами, и грунты приобретают свойство жидкости с взвешенными частицами. После завершения процесса колебаний и отжатия воды разжиженный грунт снова уплотняется.

В результате разжижения часто возникают тяжелые повреждения зданий и сооружений, в том числе объекты, находящиеся на поверхности, которые могут погрузиться в грунт, а заглубленные объекты (например, подземные резервуары) могут, наоборот, всплывать на поверхность.

Процессы разжижения часто сопровождаются неравномерными просадками, в результате чего происходят деформации и повреждения сооружений. Иногда процессы разжижения сопровождаются выбросом грязевых потоков и разжиженного грунта на поверхность.

На рис. 2.3 (фото USGS) показан широко известный пример последствий разжижения грунтов при землетрясении 16 июня

1964 года в японском городе Ниигата. На территории города, расположенной в устье реки на аллювиальных отложениях, за счет потери несущей способности оснований, вызванной разжижением водонасыщенных мелкозернистых песчаных грунтов, многоквартирные дома медленно погрузились в разжиженный грунт и наклонились. Осадки некоторых зданий превышали 1 м, а угол наклона достигал 80 градусов, то есть некоторые здания практически легли на бок.



Рис. 2.3. Эффекты разжижения грунтов при землетрясении (USGS)

В качестве другого известного примера динамической неустойчивости грунтов можно привести просадки, наблюдаемые в лессовых грунтах, которые широко распространены в странах Центральной Азии, в том числе в Туркменистане.

В условиях низкой природной влажности эти грунты, отличающиеся высокой пористостью, обладают достаточной прочностью, чтобы служить основанием зданий и сооружений. Однако увлажнение лессовых пород (например, при природном

или техногенном подтоплении застроенных территорий) ведет к разрушению цементационных связей между частицами грунта, вследствие чего проявляются их просадочные свойства, выражающиеся в способности быстро уплотняться даже под действием собственного веса. При сейсмических колебаниях вероятность и скорость проявления просадочных процессов, а также величина просадок (называемых в этом случае сеймопросадками) резко возрастает, что, соответственно, может привести к повреждениям возведенных на этих грунтах зданий и сооружений (см., например, Вознесенский, 1999, Расулов, 2020).

Склоновые явления

Сейсмические воздействия могут нарушить равновесие значительного объема горных пород на склоне и привести к образованию таких явлений, как оползни или обвалы, которые могут стать еще одной причиной жертв и разрушений. К подобным склоновым явлениям относятся также осыпи, камнепады, лавины, сели, для которых сейсмические колебания могут служить условным «спусковым крючком».

Эти явления также классифицируются как вторичные сейсмодислокации. Учитывая механизм проявления этих процессов, в которых участвуют как силы тяжести, так и сейсмические колебания, их иногда еще называют сейсмогравитационными.

Поражающими факторами подобных склоновых явлений являются удары движущихся масс горных пород, а также (в зависимости от консистенции этих твердых или разжиженных масс) заваливание или заливание пространств человеческой жизнедеятельности. Объем масс грунта при оползневых явлениях может достигать десятков и сотен тысяч кубических метров, а в отдельных случаях и более.

В результате происходят разрушения зданий и сооружений, других объектов инфраструктуры, поражение сельскохозяйственных угодий, а также перекрытие русел рек и транспортных путей, изменение ландшафта, что влечет за собой громадные экономические и социальные потери.



Рис. 2.4. Оползень, вызванный землетрясением (фото: Metych)

История знает многочисленные случаи, когда гигантские оползни хоронили под собой целые населенные пункты. Так, при Хаитском землетрясении 1949 года в Таджикистане несколько

тысяч человек погибли под обвалами и оползнями. При Гиссарском землетрясении в январе 1989 года под катастрофическим оползнем-потоком обводненной массы лессовидных суглинков были погребены 274 жителя кишлака Шарора.

Под воздействием оползня, вызванного землетрясением 13 января 2001 года в Сальвадоре, сошедшего на жилые районы Лас-Колинас в Санта-Текла (см. *Рис.2.4*, фото Metuch, 2024), погибло 585 человек.

Особенно высока предрасположенность к развитию склоновых явлений на территориях, отличающихся сложным рельефом, в частности, в горных районах.

Цунами

Цунами – это особый класс волн (перевод слова «цунами» с японского языка означает «волна в заливе»), которые возникают в морях или океанах под воздействием подводных землетрясений и распространяются на большие расстояния от места своего возникновения. Этот вторичный эффект землетрясений может представлять серьезную опасность в прибрежных районах морских акваторий.

Опасность цунами возникает именно при приближении к береговой линии, где за счет влияния подводного рельефа волны замедляются, укорачиваются, их высота увеличивается и в прибойной зоне может достигать десятков метров. Таким образом, опасность цунами грозит не судам в открытом океане, а прибрежным районам суши, в том числе расположенным там зданиям, сооружениям и промышленным объектам. При этом разрушительная сила волн может проникать вглубь прибрежной территории на несколько километров.

Одним из наиболее разрушительных и смертоносных стихийных бедствий в истории человечества явилось цунами, сопровождавшее землетрясение в Индийском океане 26 декабря 2004 года. На *рис. 2.5* (фото Ф.А.МакДэниел) показана разрушенная деревня на побережье Суматры после этого сильнейшего цунами.

Это лишь малая часть последствий цунами, разрушительная сила волн которого нанесла ущерб не только странам Юго-Восточной Азии, но и достигала берегов Африки.



Рис. 2.5. Последствия разрушительного цунами на побережье Суматры (фото: F. A. McDaniel)

Опасность цунами существует и в других регионах Земли, омываемых морями и океанами, в которых возможно возникновение сильных подводных землетрясений (моретрясений). В частности, принимая во внимание высокую сейсмичность Каспийского региона (в том числе опыт Красноводского землетрясения 1895 года), ученые не исключают вероятность возникновения цунамигенных землетрясений в акватории Каспийского моря (см., например, Доценко и др., 2003, Куликов и др., 2019).

Другие опасные явления, сопутствующие землетрясениям

Часть перечисленных выше опасных явлений (сейсмические колебания, выход разрыва на поверхность) считаются первичными, то есть напрямую представляют собой проявление эффектов землетрясения, другая часть (сейсмодетформации и разрушение грунтов, оползни, обвалы, цунами) представляет собой вторичные явления, для которых землетрясение выполняет функцию триггера, запускающего развитие этих опасных процессов.

Кроме этого, при сильных землетрясениях могут возникать и другие сопутствующие опасные явления. Так, например, в районах распространения деревянных построек в результате повреждений зданий и сооружений после землетрясений нередко возникают пожары (см. Рис.2.6). (Facts and Details, Kobe earthquake of 1995, <https://factsanddetails.com/japan/cat26/sub160/item863.html>).

В качестве еще одного примера сопутствующих явлений можно назвать затопление территорий, вызванное разрушением плотин водохранилищ или береговых дамб.

Помимо своего поражающего воздействия, подобные явления и эффекты препятствуют проведению поисково-спасательных работ и многократно умножают губительные последствия землетрясений.

Перечень сопутствующих явлений при разрушительных землетрясениях может быть значительно расширен за счет рассмотрения возможных аварий, связанных с выбросами опасных (загрязняющих или отравляющих) веществ в результате разрушения предприятий с опасными технологическими процессами.



Рис. 2.6. Пожар после землетрясения в Кобе, Япония
(Facts and Details, Kobe earthquake of 1995,
<https://factsanddetails.com/japan/cat26/sub160/item863.html>)

При очень сильных землетрясениях могут возникать целые серии так называемых каскадных эффектов, когда одно разрушительное событие ведет к возникновению другого, а в результате следующего эффекта возникают другие и так далее.

В качестве примера здесь уместно вспомнить последствия одного из сильнейших в мировой истории землетрясений, произошедшего 11 марта 2011 года в Японии (Великое восточно-японское землетрясение). Помимо разрушительных первичных сейсмических эффектов на большой территории Японии, в результате этого землетрясения возникло очень сильное цунами, которое привело к массовым разрушениям и гибели людей на островах японского архипелага. Результатом двух этих событий явилась авария на атомной электростанции Фукусима. Хотя, как показал последующий анализ, АЭС в целом выдержала воздействие сейсмических толчков, но пришедшие следом волны цунами привели к дополнительным разрушениям конструкций АЭС и возникновению крупнейшей радиационной аварии (получившая наивысший 7 уровень по международной шкале ядерных событий, INES).

Этот пример последовательного развития каскадных эффектов, показывающий возможность перехода природного катаклизма в техногенную катастрофу, подчеркивает высокую степень важности соответствующих антисейсмических мероприятий при проектировании и строительстве объектов повышенной ответственности (объекты атомной энергетики, гидротехнические сооружения и т.п.) на сейсмически опасных территориях.

Как можно видеть, описанные выше явления, сопровождающие сильные землетрясения, имеют различный механизм воздействия на здания и сооружения, тогда как большинство современных нормативных документов, предназначенных для проектирования и строительства зданий в сейсмических районах в первую очередь предусматривают расчеты на воздействие сейсмических колебаний.

Показанные выше примеры показывают, что инженеры и проектировщики, занимающиеся вопросами обеспечения сейсмомбезопасности строительных объектов, должны учитывать не только первичные, но и возможные вторичные сейсмические эффекты. Вероятность возникновения и последовательного или одновременного воздействия на объект (или территорию) нескольких видов опасностей рассматривается в рамках анализа мульти-рисков.

2.2. Макросейсмические шкалы

Изначальное предназначение макросейсмических шкал – дать оценку сейсмической интенсивности на основе наблюдаемых эффектов в разных зонах территории, подвергнутой воздействию землетрясения (решение прямой задачи макросейсмологии). При этом макросейсмические шкалы пригодны не только для анализа и оценки современных сейсмических событий, но и для прошлых землетрясений (для которых отсутствуют какие-либо инструментальные данные, а сохранились только архивные описания наблюдений современников). Используя доступное описание эффектов прошлых сильных землетрясений с помощью шкалы интенсивности возможно (с той или иной степенью точности) строить карты изосейст прошлых сейсмических событий и оценивать их интенсивность и магнитуду (решение обратной задачи макросейсмологии).

Получаемая с помощью макросейсмических исследований информация имеет большое значение при количественной оценке сейсмической опасности и сейсмическом районировании территорий.

В современной мировой практике в разных странах используются различные шкалы сейсмической интенсивности. Ниже рассмотрим более подробно шкалу MSK-64, которая до настоящего времени находит широкое применение в инженерно-сейсмологической практике, в том числе в Туркменистане.

В наименовании шкалы MSK-64 указаны инициалы специалистов, возглавлявших ее разработку, в частности, Медведе-

ва С.В. (СССР), Шпонхойера В. (Sponheuer, ГДР) и Карника В. (Kárník, Чехословакия), а также год введения шкалы в сейсмологическую практику (1964). При разработке шкалы MSK-64 учитывался опыт использования более ранних сейсмических шкал, например, шкал Росси-Фореля, Меркалли-Канкани-Зиберга и шкалы Института физики Земли (ИФЗ) (Сейсмическая шкала, 1975).

Шкала MSK-64

Шкала является 12-балльной, то есть она подразделяет весь представимый диапазон сейсмической интенсивности на 12 условных ступеней (баллов) по возрастанию от самого слабого (неощутимого) до максимально возможного (опустошительного) уровня воздействий.

Оценка уровня сейсмической интенсивности (балльности) в шкале MSK-64 основана на рассмотрении совокупности различных признаков, а именно:

- а) Люди и их окружение;
- б) Сооружения;
- в) Природные явления.

По сравнению со своими предшественницами шкала MSK-64 явилась заметным шагом вперед, представляя собой во многом усовершенствованный инструмент для проведения макросейсмических исследований после землетрясений. Однако, с современных позиций, очевидно, что она тоже не лишена недостатков и ограничений. В частности, в этой шкале рассматриваются только здания без антисейсмических мероприятий. Данный факт можно объяснить тем, что в те годы просто не доставало статистического материала, отражающего поведение сейсмостойких зданий при землетрясениях различной интенсивности. Поэтому, соответствуя своему времени, шкала MSK-64 подразделяет все сооружения всего на три типа:

а) здания из рваного камня, сельские постройки, дома из кирпича-сырца, глинобитные дома;

б) обычные кирпичные дома, здания крупноблочного и панельного типа, фахверковые строения, здания из естественного тесаного камня;

в) каркасные железобетонные здания, деревянные дома хозпостройки.

Для описания состояния зданий, подвергнутых сейсмическим воздействиям, в шкале представлена описательная классификация пяти возможных степеней повреждения:

1) Легкие повреждения: тонкие трещины в штукатурке и откалывание небольших кусков штукатурки.

2) Умеренные повреждения: небольшие трещины в стенах, откалывание довольно больших кусков штукатурки, падение кровельных черепиц, трещины в дымовых трубах, падение частей дымовых труб.

3) Тяжелые повреждения: большие и глубокие трещины в стенах, падение дымовых труб.

4) Разрушения: сквозные трещины и проломы в стенах, обрушения частей зданий, разрушение связей между отдельными частями зданий, обрушение внутренних стен и стен заполнения каркаса.

5) Обвалы: Полное разрушение зданий.

Для количественного описания наблюдаемых эффектов в шкале используются следующие характеристики:

- Отдельные (около 5%).
- Многие (около 50%).
- Большинство (около 75%)

Используя вышеперечисленные классификационные характеристики, в шкале последовательно представлено описание каждого балла сейсмической интенсивности. Ниже представлено описание всех баллов шкалы MSK-64:

I. Неощутимое землетрясение

а) Интенсивность колебаний лежит ниже предела чувствительности людей; сотрясения почвы обнаруживаются и регистрируются только сейсмографами.

II. Едва ощутимое землетрясение

а) Колебания ощущаются только отдельными людьми, находящимися в покое внутри помещений, особенно на верхних этажах.

III. Слабое сотрясение

а) Землетрясение ощущается немногими людьми, находящимися внутри помещений; под открытым небом – только в благоприятных условиях. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим легким грузовиком. Внимательные наблюдатели замечают легкое раскачивание висячих предметов, несколько более сильное на верхних этажах.

IV. Заметное сотрясение

а) Землетрясение ощущается внутри зданий многими людьми, под открытым небом – немногими. Кое-где спящие просыпаются, но никто не пугается. Колебания схожи с сотрясением, создаваемым проезжающим тяжело нагруженным грузовиком. Дребезжание окон, дверей, посуды. Скрип полов и стен. Начинается дрожание мебели. Висячие предметы слегка раскачиваются. Жидкость в открытых сосудах слегка колеблется. В стоящих на месте автомашинах толчок заметен.

V. Пробуждение

а) Землетрясение ощущается всеми людьми внутри помещений, под открытым небом – многими. Многие спящие просыпаются. Немногие лица выбегают из помещений. Животные беспокоятся. Сотрясение зданий в целом. Висячие предметы сильно качаются. Картины сдвигаются с места. В редких случаях останавливаются маятниковые часы. Некоторые неустойчивые предметы опрокидываются или сдвигаются. Незапертые двери и окна распахиваются и снова захлопываются. Из наполненных открытых сосудов в небольших количествах выплескивается жидкость. Ощущаемые колебания схожи с колебаниями, создаваемыми падением тяжелых предметов внутри здания.

б) Возможны повреждения 1-ой степени в отдельных зданиях типа А.

в) В некоторых случаях меняется дебит источников.

VI. Испуг

а) Землетрясение ощущается большинством людей, как внутри помещений, так и под открытым небом. Многие люди, на-

ходящиеся в зданиях, пугаются и выбегают на улицу. Немногие лица теряют равновесие. Домашние животные выбегают из укрытий. В немногих случаях может разбиться посуда и другие стеклянные изделия; падают книги. Возможно движение тяжелой мебели; может быть слышен звон малых колоколов на колокольнях.

б) Повреждения 1-ой степени в отдельных зданиях типа Б и во многих зданиях типа А. В отдельных зданиях типа А повреждения 2-ой степени.

в) В немногих случаях в сырых грунтах возможны трещины шириной до 1 см; в горных районах отдельные случаи оползней. Наблюдаются изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.

VII. Повреждения зданий

а) Большинство людей испуганы и выбегают из помещений. Многие люди с трудом удерживаются на ногах. Колебания отмечаются лицами, ведущими автомашины. Звонят большие колокола.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 1-ой степени; во многих зданиях типа Б повреждения 2-ой степени. Во многих зданиях типа А повреждения 3-ей степени, в отдельных зданиях этого типа – повреждения 4-ой степени. В отдельных случаях оползни проезжих частей дорог на крутых склонах и трещины на дорогах. Нарушения стыков трубопроводов; трещины в каменных оградах.

в) На поверхности воды образуются волны, вода становится мутной вследствие поднятия ила. Изменяется уровень воды в колодцах и дебит источников. В немногих случаях возникают новые или пропадают существующие источники воды. Отдельные случаи оползней на песчаных или гравелистых берегах рек.

VIII. Сильные повреждения зданий

а) Испуг и паника; испытывают беспокойство даже лица, ведущие автомашины. Кое-где обламываются ветви деревьев.

Сдвигается и иногда опрокидывается тяжелая мебель. Часть ви- сячих ламп повреждается.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 2-ой степени, в отдельных зданиях – 3-ей степени. Во многих зданиях типа Б повреждения 3-ей степени, в отдельных – 4-ой степени. Во многих зданиях типа А повреждения 4 степени, в отдельных – 5 степени. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются. Надгробные камни опрокидываются. Камен- ные ограды разрушаются.

в) Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог; трещины в грунтах достигают нескольких сантиметров. Возникают новые водоемы. Иногда пересохшие колодцы напол- няются водой или существующие колодцы иссыкают. Во многих случаях изменяется дебит источников и уровень воды в колодцах.

IX. Всеобщие повреждения зданий

а) Всеобщая паника; большие повреждения мебели. Живот- ные мечутся и издают крики.

б) Во многих зданиях типа В повреждения 3-ей степени и в отдельных – 4-ой степени. Во многих зданиях типа Б поврежде- ния 4-ой степени и в отдельных – 5-ой степени. Во многих зда- ниях типа А повреждения 5-ой степени. Памятники и колонны опрокидываются. Значительные повреждения искусственных во- доемов; разрывы части подземных трубопроводов. В отдельных случаях искривление железнодорожных рельсов и повреждение проезжих частей дорог.

в) На равнинах наводнения, часто заметны наносы песка и ила. Трещины в грунтах достигают ширины 10 см, а по склонам и берегам рек - свыше 10 см; кроме того большое количество тон- ких трещин в грунтах. Скалы обваливаются; частые оползни и осыпания грунта. На поверхности воды большие волны.

X. Всеобщие разрушения зданий

б) Во многих зданиях типа В повреждения 4-ой степени, а в отдельных – 5-ой степени. Во многих зданиях типа Б поврежде-

ния 5-ой степени, в большинстве зданий типа А повреждения 5-ой степени. Опасные повреждения плотин и дамб, серьёзные повреждения мостов. Легкие искривления железнодорожных рельсов. Разрывы или искривления подземных трубопроводов. Дорожные покрытия и асфальт образуют волнообразную поверхность.

в) Трещины в грунтах шириной несколько дециметров и в некоторых случаях – до 1 метра. Параллельно руслам водных потоков появляются широкие разрывы. Осыпание рыхлых пород с крутых склонов. Возможны большие оползни на берегах рек и крутых морских побережьях. В прибрежных районах перемещаются песчаные и илистые массы. Выплескивание воды в каналах, озерах, реках и т.д. Возникают новые озера.

XI. Катастрофа

б) Серьезные повреждения даже зданий хорошей постройки, мостов, плотин и железнодорожных путей; шоссезные дороги приходят в негодность; разрушение подземных трубопроводов.

в) Значительные деформации почвы в виде широких трещин, разрывов и перемещений в вертикальном и горизонтальном направлениях; многочисленные горные обвалы.

XII. Изменения рельефа

б) Сильное повреждение или разрушение практически всех наземных и подземных сооружений.

в) Радикальные изменения земной поверхности. Наблюдаются значительные трещины в грунтах с обширными вертикальными и горизонтальными перемещениями. Горные обвалы и обвалы берегов рек на больших площадях. Возникают озера, образуются водопады; изменяются русла рек.

Как было отмечено выше, при определении сейсмической интенсивности (бальности) используется совокупность нескольких признаков. При этом, однако, обратим внимание, что описание слабых уровней интенсивности (от I до IV баллов) базируется лишь на рассмотрении ощущений людей и поведения бытовых предметов, поскольку при этом уровне воздействий не наблюдаются ни повреждения зданий, ни природные эффекты.

При более сильных воздействиях (V–VI баллов) возникают небольшие повреждения зданий, а также сопутствующие этому уровню интенсивности природные явления. Вместе с тем поведение людей и бытовых предметов также рассматривается в качестве индикатора балльности.

При интенсивности VII и более баллов наблюдаются массовые повреждения зданий, поэтому степень повреждаемости зданий становится главным индикатором уровня интенсивности.

При самых высоких значениях интенсивности (X–XII баллов) оценки балльности основываются исключительно на признаках повреждаемости зданий и природных явлениях. Причем, как подчеркнуто в шкале, определение интенсивности сотрясения (XI и XII баллов) требует специального исследования, поскольку в случае подобной сейсмической катастрофы получение однозначной оценки балльности становится довольно затруднительным.

Сравнение макросейсмических шкал

Как отмечалось ранее, в современной мировой практике используются различные шкалы сейсмической интенсивности. Во многих странах постсоветского пространства используется 12-балльная шкала MSK-64. За более чем полвека, прошедшие после ее разработки, неоднократно рассматривались различные предложения по ее совершенствованию или введению региональных стандартов. Тем не менее, эта шкала продолжает использоваться и в настоящее время.

Среди шкал нового поколения, основанных на MSK-64, можно отметить модернизированную шкалу MMSK-86, а также шкалу сейсмической интенсивности (ШСИ-17), введенную в 2017 году в качестве национального стандарта России (ГОСТ Р 57546-2017). В странах Европы используется 12-балльная Европейская макросейсмическая шкала (EMS-98), также созданная на базовом материале шкалы MSK-64 и являющаяся ее последовательным развитием.

В США используется 12-балльная шкала MMI (Модифицированная шкала Меркалли). В Японии используется шкала сейс-

мической интенсивности Японского метеорологического агентства (JMA), представленная по своей форме как 7-балльная, хотя фактически являющаяся 10-балльной, поскольку она рассматривает «нулевой» балл (неощутимый для людей), а также вводит дополнительные (промежуточные) баллы (5 +), (5 –), (6 +), (6 –).

С целью сравнения наблюдаемых сейсмических эффектов при землетрясениях различной силы в разных частях света, в которых используются различные шкалы интенсивности, специалистами разных стран неоднократно производились попытки сравнения макросейсмических баллов и даже их конвертирования (например, Шебалин, 2003, Потапов, 2019, Musson et al, 2010, Li et al, 2021).

В таблице 2.1 приводится примерное соответствие некоторых из вышеперечисленных макросейсмических шкал.

Таблица 2.1

Сопоставление некоторых макросейсмических шкал

ММИ	JMA	ИФЗ	MSK-64	EMS-98
I	0	1	I	I
II	1	2	II	II
III	1	3	III	III
IV	2, 3	4	IV	IV
V	3	5	V	V
VI	4	6	VI	VI
VII	4, 5 –	7	VII	VII
VIII	5+	8	VIII	VIII
IX	6 –	9	IX	IX
X	6 +	10	X	X
XI	7	11	XI	XI
XII	7	12	XII	XII

Как видно из этой таблицы, в большинстве макросейсмических шкал баллы сейсмической интенсивности выражаются римскими цифрами, что изначально рекомендовалось с целью подчеркнуть целочисленный характер этого параметра.

Отметим, однако, что в настоящее время эти рекомендации не всегда соблюдаются и на практике часто можно видеть использование не только римских, но и арабских цифр, в том числе для выражения дробных значений интенсивностей.

2.3. Количественные параметры сейсмических воздействий

Сейсмическая интенсивность, выражаемая в баллах макросейсмической шкалы, является обобщенной характеристикой сейсмического эффекта и этот интегральный параметр с давних пор служит проектировщикам для описания уровня сейсмической опасности. Однако одна только интенсивность не может дать полного и достаточно точного описания сложной и многопараметрической картины сейсмической опасности и сейсмических воздействий, необходимых для целей сейсмостойкого проектирования и для обеспечения сейсмической безопасности строительных объектов. Поэтому при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений, особенно при их высокой ответственности, целесообразно (помимо интенсивности в баллах) использовать также другие характеристики сейсмических колебаний.

В современной практике для количественного описания уровня опасности широко применяются инженерные параметры сейсмических воздействий, к которым, в частности, относятся амплитудные значения колебаний, их спектральные характеристики, а также полные записи временной истории сейсмических колебаний.

Ниже рассмотрим некоторые из параметров сейсмических воздействий, применяемых на практике.

Амплитудные характеристики. Как можно понять из названия, амплитудные характеристики представляют собой значения максимальных амплитуд, представленных на временной истории (записи) сейсмических колебаний (см. Рис. 1.8), причем в качестве определяющих параметров могут рассматриваться и ускорения (A_{\max}), и скорости (V_{\max}), и смещения (D_{\max}). Наибольшее распространение в качестве меры уровня сейсмических воздействий

получили пиковые ускорения грунта (*peak ground acceleration, PGA*). Как правило, в качестве пикового значения используется максимальная амплитуда горизонтальной компоненты записи. Вместе с тем может быть получена и результирующая компонента, используя векторное суммирование двух ортогональных компонент (Рис. 1.9).

На основе анализа записей сейсмических колебаний и макросейсмических последствий землетрясений учеными разработаны эмпирические соотношения, определяющие корреляцию между сейсмической интенсивностью и инженерными параметрами колебаний (например, Trifunac and Brady, 1975, Чернов, 1989, Штейнберг и др., 1993, и другие).

Поскольку макросейсмическая интенсивность описывается совокупностью признаков и зависит от множества факторов, выявление тесной связи между каким-либо одним параметром и интенсивностью не представляется возможным. Поэтому важно понимать, что разработанные корреляционные зависимости не могут обеспечить достаточной точности. Вместе с тем, однако, они бывают весьма полезны для приближенной оценки уровня опасности при переходе от одних единиц измерения к другим.

В качестве примера, можно отметить широко применяемые инженерами ориентировочные оценки величин максимальных амплитуд ускорений 100, 200 и 400 см/с² для уровней интенсивности VII, VIII и IX баллов, соответственно (см. также соотношения, представленные в таблице 1.1).

Спектральные характеристики. Принципиально важной характеристикой сейсмических воздействий является частотный состав колебаний, которому проектировщики должны уделять особое внимание во избежание возникновения резонансных эффектов в сооружениях при землетрясениях. В качестве количественных параметров, характеризующих спектральный состав колебаний, рассматриваются: периоды (частоты), соответствующие максимальной амплитуде колебаний, спектры Фурье, а также спектры реакции.

Первый из этих параметров, периоды, соответствующие максимальной амплитуде, возможно, наиболее интуитивно понятная

характеристика, однако она не дает развернутой картины частотного состава колебательного процесса, акцентируя внимание на отдельном (причем не всегда наиболее практически значимом) амплитудном всплеске колебаний.

Гораздо более детальную и информативную картину, позволяющую оценить спектральный состав сейсмического воздействия, предоставляют амплитудные и фазовые спектры Фурье (например, Sokolov, 1998, 2002, Курбацкий, 2018).

На практике чаще используются амплитудные спектры, которые наглядно иллюстрируют распределение доминирующих гармоник в рассматриваемом диапазоне колебаний и позволяют сделать вывод как о частотном составе воздействия, так и о преобладающих частотах. В качестве примера на (Рис. 2.7) показано сравнение амплитудных спектров ускорений для двух землетрясений.

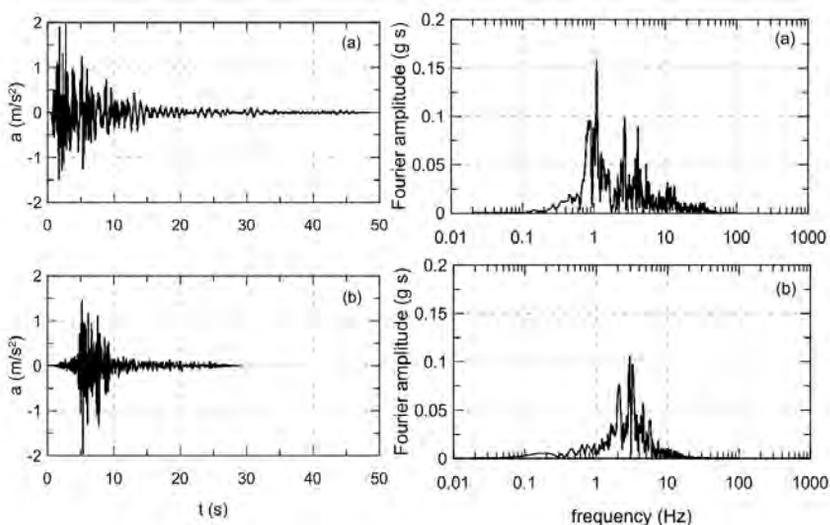


Рис. 2.7. Амплитудные спектры двух землетрясений

Слева на рисунке показаны акселерограммы, справа – амплитудные спектры. Как можно видеть, форма первого спектра (a) шире, свидетельствует о том, что колебания при первом зем-

летрясения содержат большее количество различных гармоник, причем преобладающими являются гармоники с частотой около 1 Гц. Второй спектр (*b*) имеет более узкую форму, и при этом несколько сдвинут в область более высоких частот, показывая максимальные амплитуды на частотах порядка 2–3 Гц.

Еще одной концептуально важной количественной характеристикой сейсмических воздействий являются спектры реакции (или спектры отклика), представляющие собой эффективный инженерный инструмент, используемый для оценки поведения зданий и сооружений при землетрясениях. Большинство нормативных документов, разработанных для проектирования и строительства в сейсмических районах, используют подходы, основанные на этой концепции.

Построение спектра реакции включает в себя анализ динамического поведения некоторого множества осцилляторов (систем с одной степенью свободы) с различными периодами собственных колебаний (см. Рис.2.8).

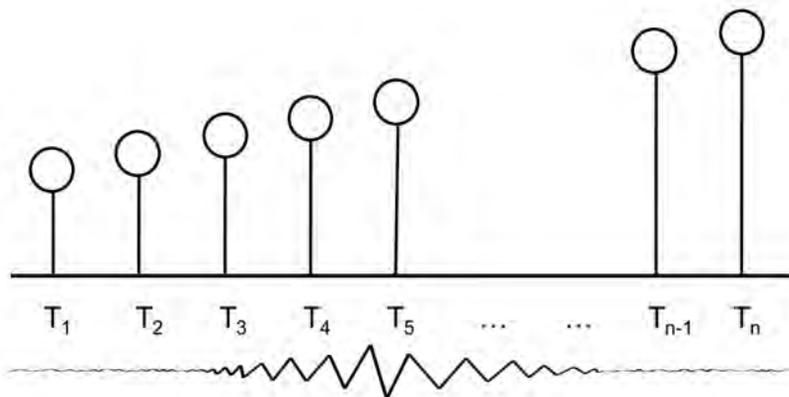


Рис. 2.8. Система осцилляторов под действием динамической нагрузки

Результирующий спектр реакции, получаемый расчетным образом, представляет собой огибающую кривую максимальных реакций (перемещений, скоростей, ускорений) системы осцилляторов, каждый из которых характеризуется собственным пери-

одом колебаний и некоторым затуханием, присущим реальным зданиям и сооружениям, на заданное сейсмическое воздействие.

При построении графика по оси абсцисс откладываются периоды собственных колебаний (или собственные частоты) осцилляторов, а по оси ординат – максимальные значения реакций осцилляторов на заданное воздействие. То есть, значение каждой точки спектра представляет собой пиковую реакцию осциллятора с соответствующим периодом. С помощью подобных расчетов могут быть получены значения спектральных ускорений (а также скоростей или смещений), которые представляют важный практический интерес для проектирования зданий и сооружений.

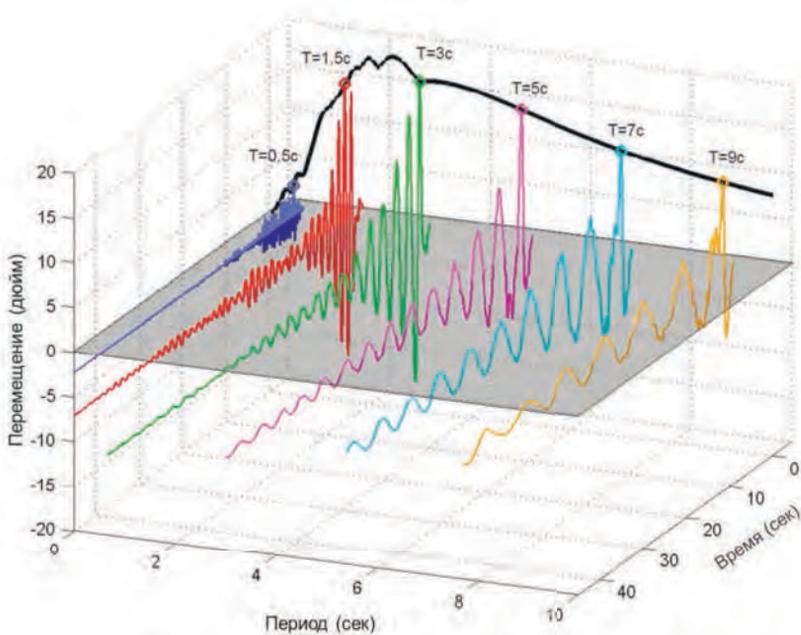


Рис. 2.9. Пример построения спектра реакции смещений

Рис. 2.9 показывает графический пример построения спектра реакции перемещений на основе записи сейсмических колебаний при землетрясении в Палм-Спрингс (Nahem, 2004).

Полученные таким образом зависимости, которые строятся, как правило, на основе региональных данных, используют-

ся в нормах сейсмостойкого проектирования (в том числе в СНТ 2-01-08-2020), где они представляют (в обобщенном и сглаженном графическом виде) коэффициенты динамичности, отражающие ожидаемую реакцию различных сооружений в различных грунтовых условиях.

Временные характеристики. Важными характеристиками сейсмических воздействий, которые также могут оказывать существенное влияние на сейсмический эффект, являются длительность и форма огибающей колебаний грунта.

В качестве количественной характеристики различными специалистами рассматриваются как абсолютная длительность колебаний, так и участки записи, превышающие некоторое пороговое значение колебаний (в частности, на практике для этих целей часто используется промежуток времени, в течение которого уровень колебаний превышает $A_{\max}/2$).

Кроме этого (в первую очередь, для проектирования особо ответственных объектов) широко используются реальные или синтезированные записи временной истории колебаний (как правило, акселерограммы).

Отметим, что в национальных строительных нормах СНТ 2-01-08-2020 (Приложение 4) содержится список как реальных, так и синтезированных акселерограмм, рекомендованных для прямых динамических расчетов зданий и сооружений на территории Туркменистана.

2.4. Оценка сейсмической опасности

В современной сейсмологической науке существует два направления исследований по оценке сейсмической опасности, первое из которых связано с сейсмическим районированием территорий, а второе – с прогнозом возникновения землетрясений.

При этом общепризнанным основным направлением считается сейсмическое районирование, задачей которого является определение вероятности возникновения сейсмических воздействий различной интенсивности в пространстве и во времени, и,

на основе полученных оценок, картирование сейсмической опасности территорий различного масштаба. Таким образом, под оценкой сейсмической опасности часто подразумевается именно это направление.

Для оценки сейсмической опасности территорий сейсмологами определяются зоны возможного возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ), составляются каталоги сейсмических событий и определяются параметры сейсмической активности, моделируются потенциальные очаги землетрясений, для которых оцениваются максимально возможные магнитуды и интенсивность колебаний, далее с учетом затухания сейсмических колебаний и инженерно-геологических характеристик среды рассчитываются пространственные оценки опасности.

В методическом плане различают детерминистический и вероятностный подходы к оценке опасности. При том, что стохастическая природа и непредсказуемость сейсмических явлений всегда была очевидна, довольно долгое время оценка сейсмической опасности базировалась на детерминистическом подходе. Лишь в последние десятилетия вероятностный подход заслуженно получил широкое распространение.

Так называемый детерминистический анализ сейсмической опасности (ДАСО) основан на оценке сейсмических воздействий от единичных событий или от совокупности землетрясений с определенным (детерминированным) уровнем максимально возможных магнитуд, которые оцениваются исходя из сейсмического потенциала окружающих очаговых зон.

Итоговой целью детерминистических расчетов является оценка максимально возможных сейсмических эффектов, иногда даже без рассмотрения вероятности их возникновения.

Расчеты сейсмической опасности выполняются для разных пунктов исследуемой территории с учетом затухания сейсмических волн с удалением от очага землетрясения, после чего на исследуемой территории оконтуриваются зоны с различным уровнем сейсмической интенсивности.

Кроме этого детерминистический подход может подразумевать оценку сейсмического эффекта от отдельного, специальным образом выбранного сейсмического события, которое часто называется «сценарным землетрясением». Выбор сценарного землетрясения и его характеристик определяется постановкой задачи, в частности, могут быть рассмотрены эффекты от проектного землетрясения (ПЗ) или максимального расчетного землетрясения (МРЗ).

Отметим, что, поскольку ДАСО не учитывает вероятностную природу сейсмических явлений, результатом выполнения детерминистических расчетов является некоторое определенное (детерминированное) значение уровня сейсмической опасности в каждом пункте исследуемой территории. Полученные оценки опасности могут выражаться как в терминах интенсивности (балльности), так и в терминах параметров сейсмических колебаний.

В отличие от детерминистического подхода, вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО), как следует из самого названия этого подхода, принимает во внимание вероятностный характер землетрясений и параметров, связанных с ними процессов, в том числе таких, как магнитуда сейсмических событий, их повторяемость, расположение очага, затухание сейсмических волн, реакция грунтов. Поэтому результаты вероятностных расчетов выражаются не в виде одного значения параметра опасности, а в виде совокупности значений, представляющих так называемые «кривые сейсмической опасности» (*hazard curves*).

Графическое представление кривой сейсмической опасности показано на рис. 2.10. По горизонтальной оси откладываются значения параметра опасности, а по вертикальной оси вероятность его превышения в течение некоторого интервала времени (например, в течение года или срока службы сооружения). В качестве параметра опасности могут использоваться как сейсмическая интенсивность (в баллах), так и параметры колебаний (например, пиковое ускорение или спектральные ускорения для различных значений периодов колебаний).

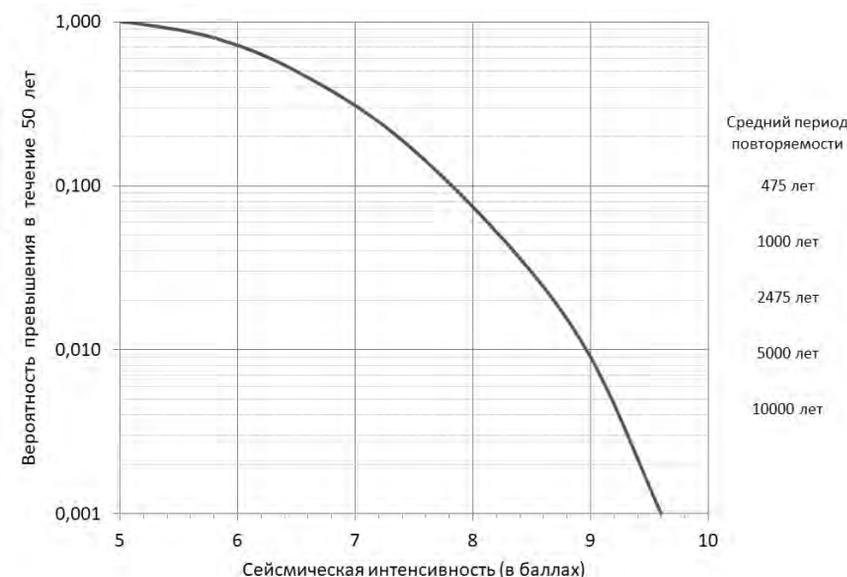


Рис. 2.10. Кривая сейсмической опасности

Такие вероятностные кривые вычисляются в каждом пункте исследуемой территории и показывают вероятность превышения различных уровней опасности за определенный интервал времени. Эти кривые количественным образом отражают очевидный факт, что сильные землетрясения (сотрясения) происходят реже, чем слабые, или, другими словами, что чем выше уровень опасности, тем меньше вероятность ее проявления.

По результатам оценки сейсмической опасности в разных точках территории с помощью ВАСО пространственное распределение опасности может быть представлено двояким образом: либо с использованием линий равной интенсивности колебаний, либо с помощью линий равной вероятности.

Различный уровень вероятности превышения соответствует различным периодам повторяемости воздействий. В современной практике применяются различные уровни вероятности в зависимости от решаемых задач.

Так, для объектов массовой застройки обычно рассматривается уровень опасности, соответствующий 10% вероятности превышения за период 50 лет (этот уровень вероятности соответствует среднему периоду повторяемости 475 лет). Для ответственных сооружений применяются оценки опасности, соответствующие большим периодам повторяемости – 1000 лет или 2475 лет. Для особо ответственных объектов рассматриваются еще более редкие события со средним периодом повторяемости 10000 лет.

Детерминистический и вероятностный подходы к оценке опасности часто дополняют друг друга. С одной стороны, детерминистический подход позволяет детально исследовать эффект отдельного сейсмического события с конкретно заданными характеристиками очага, что невозможно сделать в рамках ВАСО. С другой стороны, выбор характеристик сценарных землетрясений обычно осуществляется с учетом данных вероятностного анализа сейсмической опасности. Так, в качестве проектного землетрясения (ПЗ) может быть выбрано событие, определяющее уровень интенсивности, соответствующий среднему периоду повторяемости 475 лет, а для максимального расчетного землетрясения (МРЗ) – 2475 или 10000 лет.

Отметим, что с помощью кривых сейсмической опасности, получаемых на основе вероятностного подхода, по сути, может быть выполнен первый шаг на пути к количественной оценке сейсмического риска и к возможности управления риском. Анализируя результаты вероятностного анализа на стадии выбора проектного решения, инженер получает возможность осознанно определять уровень антисейсмических мероприятий (АСМ) с учетом срока службы и ответственности сооружения, сопоставляя возможную экономию средств и возрастающую вероятность потерь (при предпочтении относительно низкого уровня АСМ) или, наоборот, большее расходование средств при выборе более высокого уровня АСМ для повышения сейсмобезопасности объекта.

2.5. Сейсмическое районирование территорий

По результатам пространственной оценки сейсмической опасности (с помощью ВАСО или ДАСО) выполняется картирование территорий. Для построения вероятностных карт могут быть выбраны различные уровни вероятности (периоды повторяемости). Как уже отмечалось, для целей массового строительства обычно выбирается период повторяемости 475 лет.

Картирование сейсмической опасности территорий называется сейсмическим районированием. Другими словами, сейсмическим районированием называется пространственное деление территории на районы (участки) с различной интенсивностью сейсмических воздействий и вероятностью их возникновения.

В настоящее время во всем мире именно сейсмическое районирование признано первоочередным и наиболее важным шагом на пути к снижению ущерба от будущих землетрясений и предотвращению возможных сейсмических катастроф.

В зависимости от масштаба и детальности решаемых задач различают три этапа (уровня) сейсмического районирования:

- общее сейсмическое районирование (ОСР);
- детальное сейсмическое районирование (ДСР);
- сейсмическое микрорайонирование (СМР).

Для каждого из этих уровней строятся карты сейсмической опасности соответствующего масштаба. Карты ОСР (обычно предназначенные для картирования сейсмической опасности территории страны или крупного региона) строятся в масштабе от 1:1000000 и мельче, карты ДСР (охватывающие меньшую территорию, например, отдельного велаята) – в масштабе 1:500000 – 1:100000, а карты СМР (которые, как правило, разрабатываются для территорий городов и населенных пунктов) – в масштабе 1:50000 и крупнее.

Общее сейсмическое районирование является первоначальным этапом, на котором основываются все последующие разработки по картированию сейсмической опасности.

На этапе ОСР принимаются во внимание данные глобальных, региональных и межрегиональных тектонических и геодинамических взаимодействий литосферных плит и блоков земной коры, выявляются возможные источники сейсмической опасности (зоны ВОЗ) и изучаются параметры их режима. По результатам комплексных исследований, проводимых с привлечением сеймотектонических, сейсмологических, геологических, геоморфологических, геодезических, макросейсмических методов, и расчетного моделирования строятся карты ОСР, которые представляют пространственное распределение оценок исходной сейсмичности в масштабах страны или крупного региона.

Детальное сейсмическое районирование проводится, как правило, с целью уточнения карт ОСР для определенного региона страны (например, вelayata) или при строительстве объектов повышенной ответственности. За счет более детального рассмотрения характеристик исследуемой территории (включая уточнение положения очаговых зон, параметров их режима, закономерностей затухания параметров сейсмических воздействий с расстоянием) карты ДСР позволяют получить уточненные оценки исходной сейсмичности.

Важно иметь в виду, что оценки сейсмической опасности, получаемые на этапе ОСР и ДСР, не учитывают влияние грунтовых условий площадок, поскольку они определяются для так называемых «средних грунтов», под которыми обычно понимаются грунты второй категории по сейсмическим свойствам (см. СНТ.2.01.08-2020, таблица 1). Поэтому эти оценки опасности носят название «нормативной» или «исходной сейсмичности».

На этапе сейсмического микрорайонирования оценивается влияние локальных грунтовых условий на интенсивность сейсмических воздействий. Карты СМР, которые разрабатываются для территорий городов и населенных пунктов, представляют уточненные оценки «расчетной сейсмичности».

В таблице 2.2 представлено обобщенное сопоставление различных уровней сейсмического районирования.

Различные уровни сейсмического районирования

Общее сейсмическое районирование (ОСР)	Детальное сейсмическое районирование (ДСР)	Сейсмическое микрорайонирование (СМР)
Объекты исследований		
Территория страны или крупного региона	Территория малого региона. Участки строительства крупных объектов	Территория городов и населенных пунктов. Площадки ответственных сооружений
Задачи исследований		
Выявление сейсмогенных зон, изучение их сейсмического режима, определение исходной сейсмичности	Уточнение характеристик сейсмогенных зон, уточнение исходной сейсмичности	Уточнение расчетной сейсмичности за счет влияния грунтовых условий
Масштабы картирования		
1:1000000 и мельче	1:500000 – 1:100000	1:50000 и крупнее
Основное назначение карт		
Социально-экономическое планирование в масштабах страны и крупных регионов	Выбор площадок для строительства крупных и/или ответственных объектов	Проектирование и строительство сейсмостойких зданий и сооружений

Таким образом, следует различать исходную сейсмичность и расчетную сейсмичность. Исходная сейсмичность определяется по картам ОСР или ДСР, в то время как расчетная сейсмичность на картах СМР предполагает учет грунтовых условий площадки строительства и используется при проектировании и зданий и сооружений.

2.6. Глобальная карта сейсмической опасности

В период 1990–2000 гг. под эгидой ООН проводилась Международная Декада по уменьшению ущерба от природных бедствий (UN/IDNDR), в рамках которой было выполнено большое

количество важных прикладных исследований по сейсмической опасности и сейсмическому риску.

В частности, в этот период была выполнена международная программа GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program), целью которой являлась глобальная оценка сейсмической опасности (Giardini et al, 1999, Shedlock et al, 2000).

В рамках выполнения программы GSHAP вся территория планеты была разделена на несколько регионов и тестовых полигонов, где проводились сейсмологические исследования при координационной поддержке региональных центров. Важным достижением программы явилось то, что она способствовала гармонизации существующих (и часто разнящихся) подходов к оценке сейсмической опасности и развитию трансграничного научного сотрудничества. При участии рабочих групп, состоявших из национальных и международных экспертов, были подготовлены согласованные региональные каталоги землетрясений и характеристики сейсмических источников, а также рассчитаны региональные значения опасности, которые затем были обобщены и объединены на глобальном уровне.

Итогом выполнения программы GSHAP явилась публикация глобальной карты сейсмической опасности (*Рис. 2.11*). На карте разным цветом окрашены зоны, представляющие оценки сейсмической опасности в терминах максимальных (пиковых) ускорений грунта, которые с вероятностью превышения 10% в течение 50 лет (этот подход, соответствующий периоду повторяемости сейсмического эффекта в среднем один раз в течение 475 лет, принят в качестве стандарта во всем мире).

Стоит обратить внимание, что на глобальной карте высокие оценки опасности хорошо коррелируют с очертанием границ тектонических плит (*см. Рис.1.3*).

Карта GSHAP представляет хороший обзор пространственного распределения сейсмической опасности в планетарном масштабе. Однако для практического применения должны использоваться национальные карты сейсмической опасности (ОСР, ДСР, СМР).

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

Produced by the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP),
a demonstration project of the UN/International Decade of Natural Disaster Reduction, conducted by the
International Lithosphere Program.

GFZ
POTSDAM

International Decade of Natural Disaster Reduction
IDNDR
1990 - 2000
Initiated by the United Nations

Global map assembled by D. Giardini, G. Grünthal, K. Shedlock, and P. Zhang
1999

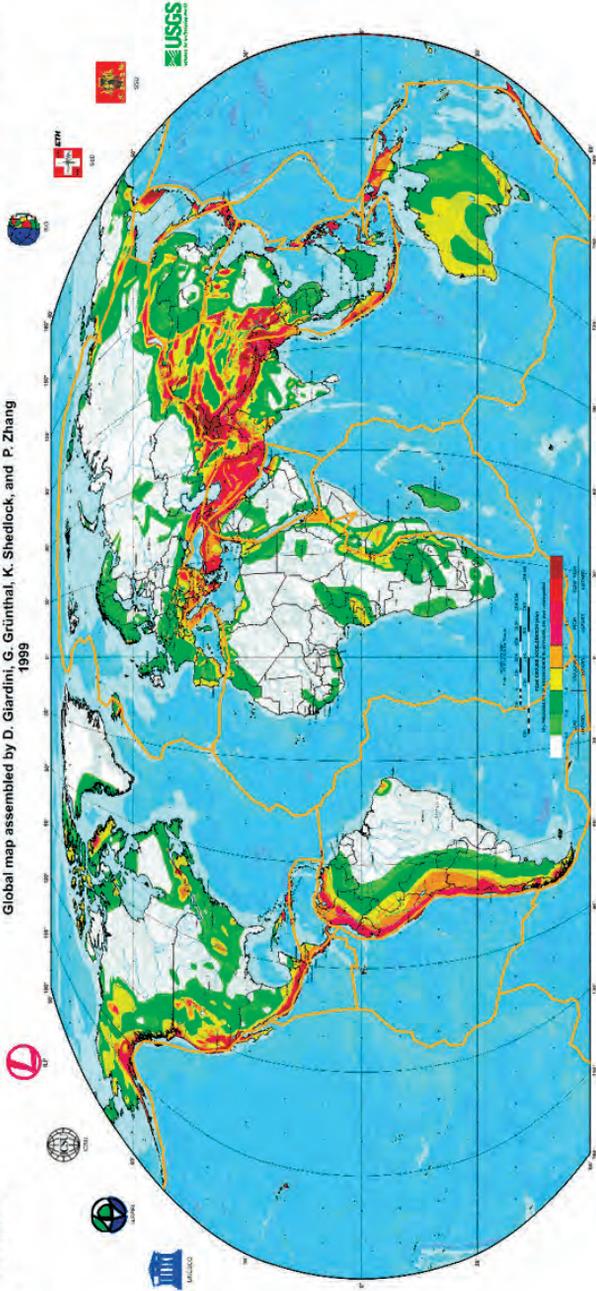


Рис. 2.11. Глобальная карта сейсмической опасности (GSHAP)

2.7. Сейсмическое районирование территории Туркменистана

С позиций глобальной тектоники Туркменистан расположен в сейсмически активном регионе Альпийско-Гималайского пояса и сейсмичность данного региона во многом обусловлена коллизией Аравийской и Евразийской плит (см. Рис.1.2).

В региональном сейсмотектоническом масштабе исследования выделяются плиты меньшего размера, в том числе Иранская, Туранская и Южно-Каспийская плиты, к границам которых приурочена большая часть сейсмической активности. На территории страны сейсмологами выделяется четыре сейсмически активных региона: Туркмено-Хорасанский, Балхано-Каспийский, Эльбурский и Гаурдак-Кугитангский. Наиболее сильные землетрясения, происшедшие на территории страны, представлены в Таблице 1.6, а их эпицентры и изосейсты показаны на рис. 1.15.

Исследования по оценке сейсмической опасности и сейсмическое районирование территории Туркменистана являются прерогативой Института сейсмологии и физики атмосферы (ИСФА) Академии наук Туркменистана. Современная карта сейсмического районирования разработана специалистами ИСФА с использованием вероятностного подхода к оценке сейсмической опасности. Составители карты: Г. Ч. Сарыева, С. С. Абасеев, М. М. Чарыев, Л. В. Безменова

Карта сейсмического районирования Туркменистана, являющаяся официальным документом для проектирования и строительства, включена в Национальные строительные нормы СНТ 2-01-08-2020.

На этой карте (см. Рис.2.12) выделяются зоны с различным уровнем сейсмической опасности, определяемой в баллах шкалы MSK-64 с указанием категории повторяемости сотрясений (СНТ 2-01-08-2020, Приложение 1). Документ сопровождается также списком наиболее крупных населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах страны (СНТ 2-01-08-2020, Приложение 2). В том числе отмечено, какие населенные пункты нахо-

дятся в зонах возможного возникновения очагов землетрясений (зонах ВОЗ) с магнитудами выше 7.0.

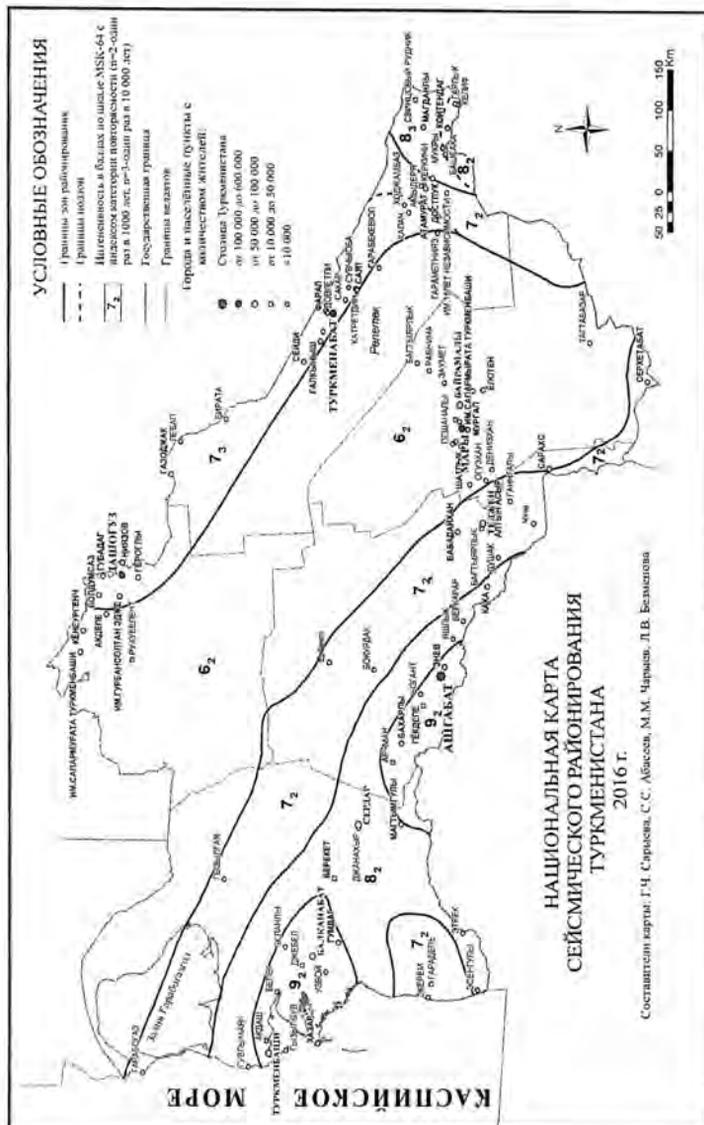


Рис. 2.12. Карта сейсмического районирования Туркменистана

2.8. Учет грунтовых условий. Сейсмическое микрорайонирование

Опытом прошлых землетрясений установлено значительное влияние локальных грунтовых условий на разрушительные последствия сильных землетрясений.

Можно указать две основные причины влияния грунтовых условий на уровень сейсмической опасности:

– первая связана с возможным усилением интенсивности сейсмических колебаний. Эффекты усиления колебаний могут наблюдаться при неблагоприятном сочетании собственных частотных характеристик верхних слоев грунта с характеристиками вынуждающих колебаний подстилающих коренных пород. При этом возможно возникновение резонансных явлений и заметный рост амплитуды сейсмических колебаний;

– вторая причина связана с возможным развитием необратимых деформаций в грунтах, служащих основанием зданий и сооружений. Эти эффекты определяются несущей способностью самих грунтов.

Необходимо иметь в виду, что на площадках с неблагоприятными в сейсмическом отношении условиями возможно значительно повышение сейсмической интенсивности (балльности). Подобный эффект называется приращением сейсмической интенсивности (ΔI) и может достигать двух и более баллов.

Для приближенной оценки приращения сейсмической балльности иногда используется так называемый метод сейсмических жесткостей (Медведев, 1962), основанный на эмпирических зависимостях, полученных по данным макросейсмических наблюдений. Сейсмическая жесткость грунтов определяется как произведение скорости распространения продольных сейсмических волн V (км/с) в рассматриваемых грунтах на их плотность ρ (г/см³),

В общем виде зависимость между приращением балльности и сейсмическими характеристиками грунтов (называемая также формулой Медведева), имеет следующий вид:

$$\Delta I = \Delta I_{сж} + \Delta I_{гв}$$

Первая часть этой формулы ($\Delta I_{сж}$) определяет вклад в общее приращение сейсмической балльности за счет разницы сейсмических жесткостей рассматриваемого грунта (обозначаемого здесь индексом i) и эталонного грунта (в качестве которого принят гранит, обозначаемый индексом 0):

$$\Delta I_{сж} = 1,67[\lg(V_0 \rho_0) - \lg(V_i \rho_i)].$$

В качестве эталонных иногда принимаются средние грунты, сейсмические характеристики которых должны быть заранее определены.

Вторая часть формулы ($\Delta I_{гв}$) показывает приращение балльности за счет влияния уровня грунтовых вод (h):

$$\Delta I_{гв} = e^{(-0,04h^2)}.$$

Приведенные эмпирические зависимости, несмотря на их приближенный характер, во многих случаях позволяют получать достоверные оценки приращения сейсмической балльности.

Анализ влияния локальных грунтовых условий, как правило, является частью работ по сейсмическому микрорайонированию территорий, проводимых для городов и населенных пунктов. Кроме того, в нормах сейсмостойкого проектирования и строительства разрабатываются соответствующие классификации грунтовых условий, тем или иным способом отражающие динамические характеристики грунтов и указывающие на возможное усиление сейсмического эффекта.

В СНТ 2-01-08-2020 (Приложение 2) приведен список населенных пунктов Туркменистана, для которых разработаны карты сейсмического микрорайонирования. С помощью этих карт может быть определена расчетная сейсмичность, необходимая при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

В районах, для которых отсутствуют карты сейсмического микрорайонирования, нормами допускается принимать сейсмичность площадки строительства в зависимости от категории

грунтов по сейсмическим свойствам, определенных по результатам инженерно-геологических исследований. В Национальных нормах Туркменистана определены три категории грунтов по сейсмическим свойствам (СНТ 2-01-08-2020, Глава I, таблица 1) и представлены рекомендации по определению расчетной сейсмичности строительных площадок.

Проведение работ по СМР в Туркменистане регламентируется Ведомственными строительными нормами ВСН 01-05 «Сейсмическое микрорайонирование территорий городов Туркменистана».

Сейсмическое микрорайонирование согласно Национальным строительным нормам входит в состав инженерных изысканий и проводится для районов с исходной сейсмичностью 6 и более баллов. Целью работ по сейсмическому микрорайонированию территорий является количественная оценка изменения (увеличения или уменьшения) степени сейсмической опасности (балльности) по сравнению с оценками балльности на картах ОСР или ДСР. Это изменение балльности, как уже отмечалось, называется приращением сейсмической интенсивности.

Важно отметить, что оценки приращения сейсмической интенсивности на картах СМР должны рассчитываться на основе прогнозирования состояния и свойств грунтов на весь период строительства и эксплуатации зданий и сооружений с учетом возможного влияния природных и техногенных факторов. В этой связи хорошей практикой является периодическое повторное (с интервалом примерно 10 лет) проведение исследований по СМР и, по мере накопления новых данных, уточнение существующих карт.

Карты СМР призваны служить развитию безопасного градостроительства в сейсмических районах, позволяя избегать участков с неблагоприятными условиями, где возможно возникновение эффектов усиления интенсивности колебаний или потери несущей способности грунтов. С помощью карт СМР осуществляется правильный выбор строительных площадок и правильная оценка уровня расчетной сейсмичности, что является одним

из важных критериев обеспечения сейсмической безопасности зданий и сооружений.

В настоящее время при проведении исследований по сейсмическому микрорайонированию территорий применяются комплексные методы (сейсмометрические, сейсморазведочные, электроразведочные, расчетные), которые позволяют получать уточненные оценки приращения сейсмической интенсивности (см., например, Nakamura, 1989, Pilz et al, 2015, Абасеев, 2023).

2.9. Прогноз и предвестники землетрясений

Как отмечалось выше, в настоящее время для обеспечения готовности общества к будущим землетрясениям в качестве основного подхода рассматривается сейсмическое районирование территорий. Учеными-сейсмологами разработаны и успешно применяются достаточно надежные методы анализа сейсмической опасности и разномасштабного районирования территорий в терминах вероятной интенсивности сейсмических воздействий и их повторяемости за определенные интервалы времени (сотни и тысячи лет).

Вместе с тем, однако, и в наши дни ученые и специалисты многих стран продолжают заниматься вопросами прогноза землетрясений, чтобы научиться предсказывать (прогнозировать) сейсмические события непосредственно перед их проявлением. Успешное решение задачи временного прогноза сильных землетрясений позволило бы заблаговременно к ним подготовиться и избежать многих их губительных последствий.

Отметим, что прогнозирование землетрясений осуществляется с учетом данных, полученных на стадии сейсмического районирования, принимая во внимание, в частности, пространственное расположение существующих тектонических разломов и их сейсмическую активность. Кроме этого, для прогнозирования готовящихся сейсмических событий используется комплекс дополнительных признаков (так называемых предвестников землетрясений).

Под прогнозом возможного землетрясения иногда понимается заблаговременное предсказание точного времени его возникновения. Однако, это лишь односторонний взгляд на комплексную проблему. Как с научной, так и с практической точки зрения успешный прогноз землетрясения связан с решением не одной, а сразу трех основных задач:

- определение места землетрясения;
- определение силы землетрясения;
- определение времени землетрясения.

Эти важные и сложные задачи решаются с разным успехом, причем предсказание времени возникновения землетрясения вплоть до настоящего времени остается наиболее сложной и практически неразрешимой задачей.

По предсказанию ожидаемого времени землетрясения прогнозные оценки можно подразделить на следующие стадии (этапы): долгосрочный, среднесрочный, краткосрочный и оперативный. Такая категоризация достаточно условна и вместе с тем практически целесообразна, поскольку каждый из этих этапов прогнозирования базируется на различных исходных данных, использует различные методы анализа и решает разные задачи.

Основной задачей этапов долгосрочного и среднесрочного прогнозирования является, прежде всего, обнаружение и локализация мест возможных очагов будущих землетрясений, которые могут произойти в следующие несколько десятилетий (долгосрочный прогноз) или ближайших лет (среднесрочный прогноз). Задачей этапа краткосрочного прогнозирования является оценка времени возникновения события в ближайшие месяцы, недели, дни или часы. Иногда в рамках краткосрочного прогнозирования (например, в условиях чрезвычайной ситуации при ожидании повторных сейсмических толчков) может выделяться так называемый оперативный прогноз (на ближайшие часы).

На этапе долгосрочного прогнозирования изучается многолетняя цикличность сеймотектонического процесса, включая периоды сейсмической активизации и затишья, и выявляются

наиболее опасные зоны, где можно ожидать возникновения очагов землетрясения. Последующие этапы прогнозирования предполагают последовательное уточнение прогнозных оценок, в частности, по расположению потенциальных очагов землетрясений, а также по времени их проявления, для чего используются различные предвестники землетрясений, свидетельствующие о процессе подготовки сейсмических событий.

В результате многолетних наблюдений и анализа различных природных явлений, закономерно сопутствующих землетрясениям, к настоящему времени обнаружено несколько сотен разностадийных предвестников различных видов (нужно отметить, что все известные предвестники землетрясений, в основном, сводятся к эмпирическим закономерностям, не имея строгого теоретического обоснования).

Предвестниками, в частности, считаются различные аномальные явления, под которыми понимаются выраженные отклонения от обычного хода сейсмотектонического процесса. Наблюдаемые аномалии дают исследователям сигнал об изменении текущей обстановки. При этом какие-то постоянно наблюдаемые явления могут исчезать, а какие-то, наоборот, появляться. Большинство известных предвестников имеют геофизическую природу, будучи связанными с закономерностями и особенностями различных геофизических полей на разных этапах подготовки землетрясения.

К наиболее известным предвестникам относятся:

- Сейсмические предвестники, связанные с пространственно-временными вариациями сейсмической активности в районе наблюдений. Сюда относится как изменение (увеличение или, наоборот, уменьшение) количества слабых землетрясений, так и пространственная миграция очагов, обусловленная процессами перераспределения напряжений в зоне подготовки землетрясения.
- Деформационные предвестники, связанные с деформациями и движениями земной коры. С целью поиска этих пред-

вестников проводятся непрерывные геодезические наблюдения за смещениями и наклонами земной коры.

- Гидрогеодинамические предвестники, связанные с изменением уровня подземных вод. В данном случае методы наблюдений включают в себя анализ уровня воды в колодцах (или в специально пробуренных скважинах).

- Гидрогеохимические и гидрогеотермические предвестники, связанные с изменением химического состава или температуры подземных вод.

- Геоэлектромагнитные предвестники, связанные с вариациями электрических и магнитных полей Земли.

- Атмосферные и ионосферные предвестники, связанные с необычными явлениями в слоях газовой оболочки Земли, которые могут проявляться, например, в виде необычной формы облаков или свечения.

- Биологические предвестники, связанные с необычным поведением биологических объектов (животных, рыб, птиц) непосредственно перед землетрясением, которые, вероятно, благодаря особой чувствительности к вариациям геофизических полей, остро реагируют на эти изменения.

Некоторые из перечисленных предвестников (например, деформации и движения земной коры или вариации сейсмического режима) проявляются задолго до возможного землетрясения, другие (например, вариации уровня и состава подземных вод, биологические предвестники) считаются краткосрочными и проявляются за считанные дни или часы до прогнозируемого события.

Важно понимать, что, несмотря на огромное количество наблюдаемых предвестников, ни один из них не дает точных указаний на время, место и силу будущего землетрясения. В разных сейсмоактивных районах различные предвестники работают по-разному, иногда проявляясь, иногда – нет и давая большой разброс в оценках.

Многолетний анализ данных различных предвестников показывает, что вероятность успешного прогноза по каждому из них

не превышает 50 %. Поскольку каждый отдельный предвестник отражает ту или иную сторону процесса подготовки землетрясения, учеными предлагается совместное использование нескольких прогностических признаков, что может позволить повысить надёжность и эффективность прогноза (Завьялов, 2009).

Более специальную информацию о существующих предвестниках землетрясений и различных методах прогноза землетрясений можно найти в приводимом в конце учебника списке литературы (например, Рикитаке, 1979, Моги, 1988, Абдуллабеков, 1989, Соболев, 1993, Завьялов, 2006, Токтосопиев, 2007, Герасименко и др., 2008),

Говоря о прогнозе землетрясений, нельзя обойти вопрос о практическом использовании его результатов, поскольку различными этапам прогноза соответствуют различные мероприятия по обеспечению сейсмобезопасности.

Так, оценки долгосрочного прогноза призваны уточнить стратегическую программу сейсмобезопасности, основанную на данных сейсмического районирования и включающую мероприятия по уменьшению последствий возможного землетрясения. На этапе среднесрочного прогноза могут быть уточнены сценарии чрезвычайных ситуаций, включая действия сил быстрого реагирования (в том числе медицинских и спасательных служб) в случае сильного землетрясения. На этапе краткосрочного прогноза предполагается объявление готовности оперативных служб и ресурсов, информирование и проведение разъяснительной работы среди населения. Оперативный прогноз, выдаваемый на ближайшие часы, предполагает непосредственное объявление тревоги и эвакуацию населения.

Наиболее проблематичным представляется краткосрочный этап прогнозирования, что связано не только со сложностью получения достоверного прогноза, но и со сложностью его практической реализации. С одной стороны, успешный прогноз и своевременная эвакуация населения могли бы спасти многие

человеческие жизни, с другой стороны, в случае неверного прогноза, принятие управленческого решения об остановке жизнедеятельности города и эвакуации населения может обернуться колоссальными экономическими потерями.

Учитывая высокую степень неопределенности получаемых прогнозных оценок, надо признать, что в настоящее время практической пользы от кратковременного прогноза мало. Поэтому работы, продолжающиеся в этом направлении, имеют сугубо научно-исследовательское значение.

Вопросы для самоконтроля по второй главе

1. Что такое сейсмическая опасность?
2. Каким образом могут проявляться сейсмические эффекты?
3. Какие вы знаете первичные и вторичные эффекты землетрясений?
4. Что такое каскадные эффекты при землетрясениях?
5. Какие макросейсмические шкалы вы знаете?
6. Какая макросейсмическая шкала применяется в Туркменистане?
7. По каким признакам оценивается уровень сейсмической интенсивности?
8. Какие количественные параметры сейсмических воздействий вы знаете?
9. Что такое спектральное ускорение?
10. Что такое спектр реакции?
11. Какие существуют методы оценки сейсмической опасности?
12. Какая разница между ДАСО и ВАСО?
13. Что такое сейсмическое районирование?
14. Что такое сейсмическое микрорайонирование?
15. Что такое прогноз землетрясений?
16. Какие существуют предвестники землетрясений?
17. Почему краткосрочный прогноз не применяется на практике?

III ГЛАВА СЕЙСМИЧЕСКАЯ УЯЗВИМОСТЬ

3.1. Понятие сейсмической уязвимости

Понятие уязвимости в общем смысле подразумевает незащищенность объекта или слабость его защиты перед существующей опасностью, его неспособность противостоять опасным воздействиям. Уязвимость – понятие очень многогранное, затрагивающее самые разные стороны жизнедеятельности, как отдельного человека, так и общества. В частности, уязвимость может быть связана с вопросами здоровья человека или его окружения, или рассматривать технические, социальные, экономические, политические и другие аспекты, в том числе уязвимость играет важную роль в контексте существующих природных опасностей.

Говоря об уязвимости, необходимо понимать, что она всегда связана, с одной стороны, с фактором существующей опасности, а с другой стороны, отражает свойства самого объекта, подверженного этой опасности. Подчеркнем, что уязвимость всегда отражает отношение к определенному виду опасности. В самом деле, возьмем простой пример, рассматривая в качестве возможных опасностей огонь и воду, мы понимаем, что огнестойкость объекта совсем не означает его водостойкость, и наоборот. То есть объект может быть неуязвимым по отношению к одной опасности, будучи уязвимым по отношению к другому виду опасности. Можно привести множество таких примеров, показывающих, что уязвимость всегда следует рассматривать в контексте определенного вида опасности.

В настоящем изложении мы рассматриваем уязвимость по отношению к землетрясениям, которая называется сейсмической уязвимостью. Заметим, что сейсмическая уязвимость может иметь различные проявления по отношению к различным (первичным и вторичным) сейсмическим эффектам. В частности,

различают физическую уязвимость, которая связана с повреждением конструкций (ее также называют конструктивной или структурной) и функциональную уязвимость, которая связана с потерей функциональной полезности объекта. В качестве примера последней можно привести полный или частичный выход из строя элемента транспортной системы (например, моста), что может нарушить функционирование всей системы.

Кроме этого, при анализе рисков рассматривают экономические, социальные, а также другие уязвимости, связанные с организационными, образовательными и другими аспектами, которые могут вносить вклад в повышение общего уровня риска катастроф. Основное внимание в дальнейшем изложении уделено физической уязвимости, связанной со способностью конструкций сопротивляться сейсмическим воздействиям.

В соответствии с нормами проектирования и строительства в сейсмических районах под сейсмостойкостью зданий и сооружений понимается их способность противостоять сейсмическим воздействиям, обеспечивая сохранение своих эксплуатационных качеств и безопасность находящихся в них людей. При этом важно понимать, что в зданиях, как правило, могут допускаться некоторые конструктивные повреждения, которые, с одной стороны, не препятствуют эвакуации людей и, с другой стороны, не ведут к порче, находящихся в них материальных ценностей. Что касается сейсмической уязвимости, под этим понятием обычно подразумевается понятие обратное их сейсмостойкости.

Отметим, что сейсмостойкими зданиями часто называют здания с антисейсмическими мероприятиями, тогда как здания без антисейсмических мероприятий считаются несейсмостойкими. Такая достаточно общая формулировка заслуживает некоторого уточнения в том смысле, что строительным объектам, которые изначально считаются сейсмостойкими, также может быть присуща определенная конструктивная уязвимость, связанная с особенностями этих объектов. Эта уязвимость может формиро-

ваться на различных этапах проектирования, строительства и/или эксплуатации зданий и сооружений. В частности, уязвимость может быть связана с недостатками проектирования, дефектами строительных материалов и/или конструктивных элементов, нарушением технологий строительного производства или возникать в процессе эксплуатации зданий и сооружений под воздействием внутренних или внешних факторов.

Важно понимать, что уязвимость может относиться к различным элементам или узлам сооружения, в том числе как к несущим элементам (поведение которых не влияет на целостность сооружения в целом), так и к несущим конструкциям (которые могут быть ответственны за общую целостность сооружения).

Соответственно, в зависимости от количества уязвимых элементов и степени их ответственности в общей конструктивной схеме, сейсмическая уязвимость сооружения может быть различного уровня, как незначительного, так и весьма существенного. Более того, необходимо принимать во внимание, что уязвимость может накапливаться со временем в ходе эксплуатации строительных объектов и, таким образом, изначально сейсмостойкие здания могут оказаться несейсмостойкими и, соответственно, небезопасными.

Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод, что термин «сейсмическая уязвимость», получивший в инженерно-сейсмологической практике последних десятилетий довольно широкое распространение для характеристики поведения зданий и сооружений при землетрясениях, представляет собой более гибкое и вместе с тем специфицирующее инженерное понятие, нежели привычный и более общий термин «сейсмостойкость». Вместе с тем существующая взаимосвязь между этими противоположными понятиями остается очевидной, а именно, чем выше конструктивная уязвимость зданий, тем менее они сейсмостойкие.

3.2. Повреждаемость зданий при землетрясениях

На поведение зданий и сооружений при землетрясениях влияют не только характеристики сейсмических воздействий (в том числе, интенсивность, спектральный состав, длительность колебаний), но также в значительной мере конструктивные характеристики самих сооружений (определяющие их сейсмостойкость и сейсмическую уязвимость). Соответственно, в зависимости от сочетания этих факторов, характеризующих внешнее воздействие и внутреннее противодействие, в конструкциях зданий могут возникать повреждения различной степени тяжести.

Как рассматривалось выше, для описания состояния здания, подвергнутого сейсмическим воздействиям, шкала MSK-64 рассматривает пять различных степеней повреждения. В шкале EMS-98, которая является усовершенствованием шкалы MSK-64, также рассматриваются пять возможных степеней повреждения, градация которых изложена более детально и дифференцировано. Ниже рассмотрим некоторые из основных введенных усовершенствований.

Во-первых, при анализе повреждений, вызванных землетрясениями, следует иметь в виду различный механизм развития повреждения конструкций в зданиях различного типа. Во-вторых, при определении степени повреждения здания следует различать структурные (несущие) и неструктурные (ненесущие) элементы и их повреждения.

Структурными или несущими называются элементы здания, которые формируют его конструктивную схему и предназначены для восприятия внешних нагрузок. К таким конструкциям относятся, в частности, фундаменты, несущие стены, колонны, балки, плиты перекрытий и покрытия, ядра и диа-

фрагмы жесткости. В свою очередь, неструктурными или несущими элементами называются те части здания, которые не относятся к его конструктивной схеме и не предназначены для непосредственного восприятия внешних нагрузок. Основным предназначением неструктурных элементов является выполнение архитектурных, планировочных, технологических или других функций (к ним относятся, например, несущие стены, перегородки, заполнения оконных и дверных проемов, парапеты, фронтоны, дымовые трубы, а также элементы оборудования зданий).

В EMS-98 дается более детальное чем в MSK-64 описание каждой из возможных степеней повреждения. С одной стороны, за счет дифференциации зданий по материалу несущих конструкций, рассматриваются отдельно каменно-кирпичные и железобетонные здания, а, с другой стороны, классификация степеней повреждения рассматривает состояние и несущих, и несущих элементов.

Классификация степеней повреждений EMS-98 для каменных и кирпичных зданий иллюстрируется в таблице 3.1, а для железобетонных зданий – в таблице 3.2. Представленная в этих таблицах информация по повреждению структурных и неструктурных элементов зданий наглядно характеризует их текущее физическое состояние после воздействия землетрясения, соответствующее различным степеням повреждения.

Попутно отметим, что представленное описание повреждений дает возможность ориентировочно оценить объем (а также в определенной степени и целесообразность) восстановительных работ после землетрясения. Такие оценки экономических потерь и затрат, соответствующих каждому возможному состоянию поврежденных зданий, необходимы для расчетов сейсмического риска.

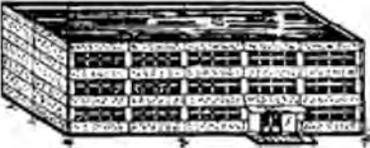
Классификация повреждений каменных зданий

Вид	Описание
	<p>Степень 1: Повреждения от практически незаметных до легких (отсутствие повреждений несущих конструкций, легкие повреждения неструктурных элементов). Волосяные трещины в некоторых стенах. Откалывание небольших кусочков штукатурки. В отдельных случаях падение незакрепленных камней с верхних частей зданий.</p>
	<p>Степень 2: Умеренные повреждения (легкие повреждения несущих конструкции, умеренные повреждения неструктурных элементов). Трещины во многих стенах. Откалывание довольно больших кусков штукатурки. Частичное обрушение дымовых труб.</p>
	<p>Степень 3: Повреждения от значительных до тяжелых (умеренные повреждения несущих конструкций, тяжелые повреждения неструктурных элементов). Большие и глубокие трещины в большинстве стен. Падение элементов кровельной черепицы. Разрушение всех дымовых труб на крыше; разрушение отдельных неструктурных элементов (перегородки, стены фронтона).</p>

	<p>Степень 4: Очень тяжелые повреждения (тяжелые повреждения несущих конструкций, очень тяжелые повреждения неструктурных элементов). Значительное разрушение стен; частичное разрушение несущих конструкций крыш и перекрытий.</p>
	<p>Степень 5: Разрушение (очень тяжелые повреждения несущих конструкций). Полное или почти полное обрушение.</p>

Таблица 3.2

Классификация повреждений железобетонных зданий

Вид	Описание
	<p>Степень 1: Повреждения от практически незаметных до легких (отсутствие повреждений несущих конструкций, легкие повреждения неструктурных элементов). Тонкие трещины в штукатурке по деталям каркаса или в цоколе. Тонкие трещины в перегородках и заполнении каркаса.</p>
	<p>Степень 2: Умеренные повреждения (легкие повреждения несущих конструкций, умеренные повреждения неструктурных элементов). Трещины в колоннах, балках каркаса и несущих стенах. Трещины в перегородках и заполнении; падение хрупкой облицовки и штукатурки. Откалывание раствора из швов стеновых панелей.</p>

	<p>Степень 3: Повреждения от значительных до тяжелых (умеренные повреждения несущих конструкций, тяжелые повреждения неструктурных элементов).</p> <p>Трещины в колоннах и узлах соединения ригелей со стойками каркаса у фундамента и в стыках связанных стен. Повреждения защитного слоя бетона, изгиб стержневой арматуры. Большие трещины в перегородках и стеновом заполнении, разрушение отдельных панелей и стенового заполнения.</p>
	<p>Степень 4: Очень тяжелые повреждения (тяжелые повреждения несущих конструкций, очень тяжелые повреждения неструктурных элементов).</p> <p>Большие трещины в элементах несущей конструкции с раздавливанием бетона и разрушением арматурных стержней; нарушение сцепления арматурных стержней в балках, наклон колонн. Падение нескольких колонн или обрушение верхнего этажа.</p>
	<p>Степень 5: Разрушение (очень тяжелые повреждения)</p> <p>Обрушение первого этажа или частей (например, крыльев) здания.</p>

3.3. Классификация сейсмической уязвимости

В шкале MSK-64 определены всего три типа сооружений: Тип А – здания из рваного камня, сельские постройки, дома из кирпича - сырца, глинобитные дома; Тип Б – обычные кирпичные дома, здания крупноблочного и панельного типа, фахверковые строения, здания из естественного тесаного камня; Тип В – каркасные железобетонные здания, деревянные дома хорошей постройки.

Хотя, как можно видеть, в целом эти типы зданий сгруппированы и ранжированы по возрастанию их сейсмостойкости, эта классификация зданий рассматривает только здания, возведенные без специальных антисейсмических мероприятий. Поэтому в последующие годы шкала MSK-64 получила свое дальнейшее развитие (в шкалах MMSK-86, EMS-98), которые, помимо прочих усовершенствований, были дополнены другими современными типами зданий, включая здания с антисейсмическими мероприятиями.

В современной версии Европейской Макросейсмической Шкалы (EMS-98), которая также основана на базовом материале шкалы MSK-64, для характеристики поведения зданий при землетрясениях был введен термин «сейсмическая уязвимость». Более того в EMS-98 впервые была представлена классификация сейсмической уязвимости, которая представляет собой ранжирование различных типов зданий в зависимости от их конструктивных характеристик и особенностей, определяющих их поведение и повреждаемость при землетрясениях (*Табл. 3.3*).

Как можно видеть из представленной таблицы, все типы зданий подразделяются на шесть классов уязвимости от А (наиболее уязвимый класс) до F (наименее уязвимый класс зданий).

Класс сейсмической уязвимости зависит, в первую очередь, от материала несущих конструкций, конструктивной схемы здания, а также уровня антисейсмических мероприятий (АСМ).

Вместе с тем, учитывая, что поведение зданий при сейсмических воздействиях зависит также от совокупности других факторов, в таблице уязвимости представлен не только наиболее вероятный класс уязвимости, но также и диапазон возможных вариаций для разных типов зданий.

Таблица 3.3

Классификация сейсмической уязвимости EMS-98

Типы зданий		Класс уязвимости					
		A	B	C	D	E	F
Кирпичная и каменная кладка	Бутовый камень, полевой камень	○					
	Саман (кирпич-сырец)	○	—				
	Простой камень	—	○				
	Массивный камень			○	—		
	Неармированная кладка (кирпич, блоки)	—	○	—			
	Неармированная кладка с ж/б перекрытиями			○	—		
	Усиленная кладка				○	—	
Железобетон (ж/б)	Каркасные конструкции без АСМ	—		○	—		
	Каркасные конструкции с умеренным уровнем АСМ			○	—	—	
	Каркасные конструкции с высоким уровнем АСМ				○	—	—
	Стеновые конструкции без АСМ	—	○	—			
	Стеновые конструкции с умеренным уровнем АСМ		○	—			
	Стеновые конструкции с высоким уровнем АСМ			○	—		
Сталь	Стальные сооружения				○	—	
Дерево	Деревянные сооружения		○	—			
○	Наиболее вероятный класс уязвимости						
—	Вероятный диапазон						
.....	Менее вероятные (исключительные) случаи						

При этом важно подчеркнуть, что здания одного и того же конструктивного типа могут принадлежать к различным классам сейсмической уязвимости, принимая во внимание существующие неопределенности, связанные с характеристиками здания, а также другими факторами, которые могут существенно повлиять на их сейсмическую уязвимость.

Совокупность факторов, влияющих на сейсмическую уязвимость зданий, можно подразделить на следующие группы:

Архитектурно-планировочные и конструктивные особенности.

- Конструктивная схема.
- Материал несущих конструкций.
- Регулярность (нерегулярность).
- Податливость (способность пластического деформирования).

– Этажность.

– Количество и размер проемов в несущих стенах.

– Фундаменты.

– Антисейсмические мероприятия.

Качество.

– Качество проектирования.

– Качество строительных материалов и изделий.

– Качество строительных работ.

Эффекты расположения.

– Соударение с примыкающими зданиями.

– Локальные грунтовые условия и возможное взаимодействие системы «грунт-сооружение».

– Влияние рельефа.

Состояние здания.

– Возраст здания.

– Накопленные повреждения (например, в результате прошлых землетрясений или других внешних воздействий).

– Модификация здания (в плане или по высоте).

– Ремонт, эксплуатация, усиление конструкций.

Некоторые из вышеперечисленных факторов могут возникать уже на стадии проектирования, другие могут появиться на стадии строительства или в процессе эксплуатации здания. Таким образом, здания, изначально считающиеся сейсмостойкими, фактически могут оказаться сейсмически уязвимыми и небезопасными.

Наличие тех или иных факторов может быть выявлено при обследовании существующих зданий, а принятие их во внимание позволит получить уточненную оценку класса уязвимости и, соответственно, прогнозировать их поведение и повреждаемость при землетрясениях.

3.4. Количественное представление сейсмической уязвимости зданий

Для количественного представления сейсмической уязвимости различных типов зданий и оценки вероятного уровня повреждений в расчетах риска используются различные соотношения, связывающие уровень сейсмической интенсивности и ожидаемый уровень повреждений (ущерба). Прежде всего, отметим матрицы повреждаемости (или матрицы вероятности повреждения, Damage Probability Matrices), графики повреждаемости (или графики вероятности повреждений, Fragility Curves), а также функции сейсмической уязвимости (Vulnerability Functions).

Принимая во внимание стохастическую природу сейсмических колебаний, а также существующие неопределенности как в характеристиках сооружений, так и в реакции сооружений на сейсмические воздействия, необходимо понимать, что все вышеуказанные соотношения, используемые для оценки уязвимости и ущерба, носят вероятностный характер.

Матрицы вероятности повреждения, как следует из самого их названия, представляют собой вероятностные зависимости повреждаемости зданий при сейсмических воздействиях, представленные в матричном виде.

Общий вид матрицы вероятности повреждения показан в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Матрица вероятности повреждения

Состояние поврежденного здания	Вероятность (%) возникновения различных степеней повреждения при различной сейсмической интенсивности (в баллах)				
	VI	VII	VIII	IX	X
Степень 0	P(0,6)	P(0,7)	P(0,8)	P(0,9)	P(0,10)
Степень 1	P(1,6)	P(1,7)	P(1,8)	P(1,9)	P(1,10)
Степень 2	P(2,6)	P(2,7)	P(2,8)	P(2,9)	P(2,10)
Степень 3	P(3,6)	P(3,7)	P(3,8)	P(3,9)	P(3,10)
Степень 4	P(4,6)	P(4,7)	P(4,8)	P(4,9)	P(4,10)
Степень 5	P(5,6)	P(5,7)	P(5,8)	P(5,9)	P(5,10)
Суммарная вероятность (%)	100	100	100	100	100

В ячейках матрицы повреждаемости (Табл. 3.4) на пересечении строк, соответствующих различной степени повреждения (от $d = 0$ до $d = 5$), и столбцов, соответствующих различной сейсмической интенсивности I (от VI до X), показаны значения вероятности $P(d, I)$, соответствующие возникновению данной степени повреждения d при данном уровне интенсивности I .

Отметим, что в некоторых случаях в наиболее уязвимых зданиях застройки могут возникать повреждения и при более низком уровне интенсивности (V), однако, как правило, матрицы повреждаемости рассматривают диапазон сейсмических воздействий, начиная от интенсивности VI и выше.

Таким образом, каждый из столбцов матрицы показывает оценку количественного распределения вероятных степеней повреждения в однотипных зданиях при одинаковых уровнях воздействий (для каждого рассматриваемого уровня интенсивности).

Понятно, что, если для слабых землетрясений, наиболее высока вероятность незначительных или легких повреждений, то с увеличением сейсмической интенсивности повышаются вероятности возникновения более высоких степеней повреждения. При этом очевидно, что сумма вероятностей для каждого столбца должна быть равна 100% (или же 1, в случае выражения вероятностей в долях единицы), что соответствует сумме всех зданий данного типа, подвергшихся сейсмическому воздействию одинаковой силы.

Поскольку различные типы зданий имеют различную сейсмическую уязвимость и при землетрясениях ведут себя по-разному, подобные матрицы повреждаемости разрабатываются для различных типов зданий, учитывая особенности их поведения при сейсмических воздействиях.

Для этих целей могут быть использованы как эмпирические данные (полученные по результатам макросейсмического анализа последствий прошлых землетрясений, например, Biglari, 2020), так и данные, полученные расчетным путем (с помощью компьютерного моделирования, например, Gueguen, 2013) или на основе статистической обработки экспертных оценок (например, ATC-13, 1985).

В частности, что касается эмпирического подхода, усредненные оценки могут быть получены с использованием количественного описания повреждаемости различных типов (классов) зданий при сейсмических воздействиях различной интенсивности, представленного в макросейсмических шкалах (в том числе MSK-64, MMSK-86, EMS-98).

В Таблице 3.5 представлены матрицы вероятности повреждения для зданий, соответствующих шести различным классам сейсмической уязвимости EMS-98 от А до F, построенные с использованием нормального распределения вероятностей (Tyagunov et al, 2006).

Таблица 3.5

**Матрицы вероятности повреждения для различных классов
сейсмической уязвимости EMS-98**

Класс А						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	92,5	50	0	0	0	0
1	7,5	42,5	7,5	0	0	0
2	0	7,5	42,5	7,5	0	0
3	0	0	42,5	42,5	7,5	0
4	0	0	7,5	42,5	42,5	7,5
5	0	0	0	7,5	50	92,5
Класс В						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	92,5	50	7,5	0	0	0
1	7,5	42,5	42,5	7,5	0	0
2	0	7,5	42,5	42,5	7,5	0
3	0	0	7,5	42,5	42,5	7,5
4	0	0	0	7,5	42,5	42,5
5	0	0	0	0	7,5	50
Класс С						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	100	92,5	50	7,5	0	0
1	0	7,5	42,5	42,5	7,5	0
2	0	0	7,5	42,5	42,5	7,5
3	0	0	0	7,5	42,5	42,5
4	0	0	0	0	7,5	42,5
5	0	0	0	0	0	7,5

Таблица 3.5

Матрицы вероятности повреждения для различных классов сейсмической уязвимости EMS-98 (продолжение)

Класс D						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	100	100	92,5	50	7,5	0
1	0	0	7,5	42,5	42,5	7,5
2	0	0	0	7,5	42,5	42,5
3	0	0	0	0	7,5	42,5
4	0	0	0	0	0	7,5
5	0	0	0	0	0	0
Класс E						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	100	100	100	92,5	50	7,5
1	0	0	0	7,5	42,5	42,5
2	0	0	0	0	7,5	42,5
3	0	0	0	0	0	7,5
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
Класс F						
Степень повреждения	Сейсмическая интенсивность в баллах					
	V	VI	VII	VIII	IX	X
0	100	100	100	100	92,5	50
1	0	0	0	0	7,5	42,5
2	0	0	0	0	0	7,5
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0

Альтернативным вариантом количественного представления вероятности повреждения зданий при сейсмических воздействиях являются графики повреждаемости, которые представляют собой семейство кривых, показывающих вероятность возникновения повреждений различной степени в зависимости от уровня сейсмического воздействия.

Общий вид графика повреждаемости показан на рис. 3.1 (FEMA, 2001), где представлены кривые вероятности повреждения для четырех дискретных состояний: (1) – легкое повреждение, (2) – умеренное повреждение, (3) – значительное повреждение, (4) – полное разрушение.

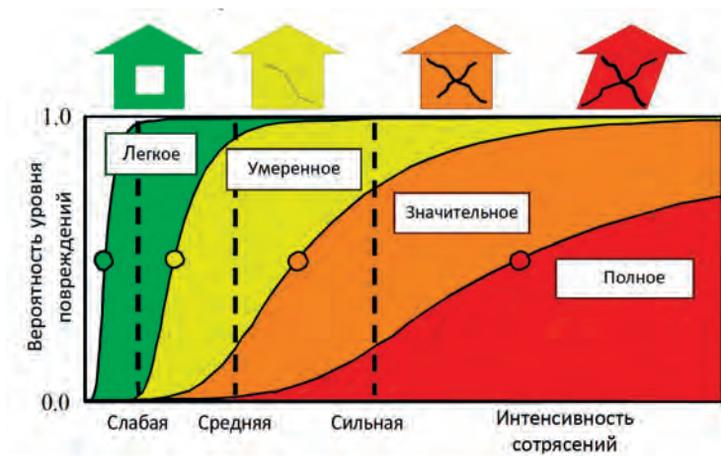


Рис. 3.1. Общий вид графика повреждаемости (FEMA, 2001)

По горизонтальной оси откладывается мера интенсивности сейсмических колебаний (которая может быть представлена как в терминах балльности макросейсмической шкалы, так и в терминах параметров колебаний грунта), а по вертикальной оси – условная вероятность достижения (или превышения) различных степеней (состояний) повреждения здания при данном уровне интенсивности колебаний.

Существует прямая связь между графиками вероятности повреждения и матрицами вероятности повреждения, в частности, рассматривая расстояние по вертикали между различными кривыми повреждаемости (Рис. 3.1) можно видеть, что интервал между каждыми двумя кривыми показывает вероятность того, что для определенного уровня интенсивности состояние конструктивной системы будет соответствовать данной степени повреждения. При этом, естественно, полная сумма вероятностей для всех возможных состояний повреждения равна единице (или 100%).

Графики повреждаемости получили наиболее широкое распространение в современной практике сейсмической оценки сооружений. Их преимуществом является возможность построения и оценки вероятности повреждения для непрерывного изменения параметра меры интенсивности, например, пикового ускорения грунта или спектрального ускорения, в то время как матрицы вероятности повреждения строятся только для целочисленных (дискретных) значений сейсмической интенсивности (балльности).

На основе матриц вероятности повреждения и/или графиков повреждаемости в совокупности с оценками ущерба (потерь), соответствующих каждой из рассматриваемых степеней повреждения, могут быть построены функции сейсмической уязвимости, представляющие зависимость уровня прямых потерь (или удельного ущерба, связанного с конструктивным повреждением сооружений) от интенсивности сейсмических воздействий.

Обычно удельный ущерб выражается в процентах от общей стоимости строительства здания или сооружения.

Математически, как будет показано ниже, ожидаемая величина среднего удельного ущерба для определенного уровня сейсмической интенсивности рассчитывается суммированием произведений среднего ожидаемого ущерба для определенного уровня повреждения (степени повреждения) и соответствующих вероятностей для всего диапазона возможных степеней повреждений здания.

Так же как матрицы вероятности повреждения и графики повреждаемости, функции сейсмической уязвимости строятся для разных типов зданий (или классов уязвимости) и используются для количественной оценки ущерба, вызванного землетрясениями (сейсмического риска).

В качестве примера на рис. 3.2 представлены функции сейсмической уязвимости, построенные для различных классов зданий в соответствии с классификацией EMS-98.

Как уже отмечалось, по горизонтальной оси откладывается сейсмическая интенсивность (в баллах), а по вертикальной

оси – оценка удельного ущерба (в процентах от полной стоимости рассматриваемого сооружения). Понятно, что с повышением сейсмической интенсивности величина ожидаемого ущерба (как и вероятность повреждения) для всех типов зданий пропорционально увеличивается и при этом для более уязвимых классов зданий (А, В) величина ущерба значительно выше.

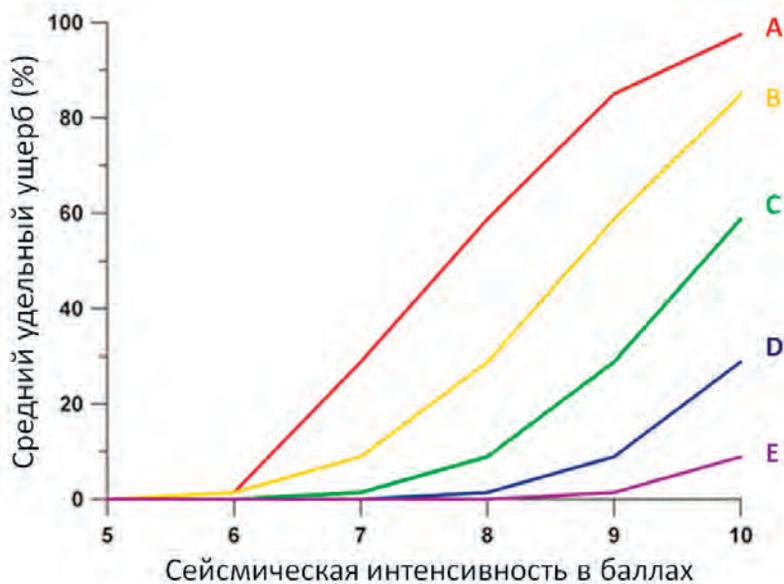


Рис. 3.2. Функции сейсмической уязвимости EMS-98

Представленные выше графики могут быть использованы для количественного представления сейсмической уязвимости различных типов зданий и (в качестве универсального инструмента) применяются для оценки риска в различных сейсмоопасных регионах.

Вместе с тем необходимо понимать, что в каждом регионе, в каждой стране существуют свои классификации и типы зданий, характеристики которых отражают региональные и национальные особенности и правила проектирования и строительства, используемые строительные материалы и технологии, что, в со-

вокупности, отражается на несущей способности зданий и сооружений и их поведении при землетрясениях.

Поэтому особую ценность представляют исследования и результаты, получаемые на основе национальных, региональных и местных данных.

Ниже рассматривается типология конструктивных решений зданий, представленных в существующей застройке городов и населенных пунктов Туркменистана и оценка их повреждаемости при землетрясениях.

3.5. Типы зданий в Туркменистане и оценка их повреждаемости

Существующая застройка городов и населенных пунктов Туркменистана представлена очень разнообразными типами зданий, в том числе характеризующимися различным уровнем сейсмической уязвимости.

В современной редакции национальных строительных норм (СНТ 2.01.08-2020, Приложение 5) приведена подробная классификация конструктивных типов зданий в Туркменистане, разработанная отечественными специалистами. Эта классификация содержит 9 типов зданий (*Таблица 3.6*) и основывается, в первую очередь, на материале несущих конструкций зданий и их конструктивной схеме.

Таблица 3.6.

Классификация типов зданий по конструктивному решению

Тип 1	Дома со стенами из глинобитных материалов, кладки сырцового кирпича или рваного камня, выполненными без усиления деревянным каркасом, в том числе: а) с тяжелой глинобитной кровлей; б) с легкой деревянной кровлей. (Без расчетной сейсмичности).
Тип 2	Дома со стенами из глинобитных материалов, выполненными с усилением деревянным каркасом, соединенным с фундаментом. (Без расчетной сейсмичности).

1	2
Тип 3	Дома с кирпичными (каменными) стенами, выполненными без антисейсмических усилений. Дома деревянные каркасно-щитовой конструкции. Дома со стенами из кладки блоков ячеистого бетона и облегченными покрытиями (Без расчетной сейсмичности).
Тип 4	Дома с кирпичными (каменными) стенами, выполненными с антисейсмическими усилениями в виде антисейсмических поясов и армирования горизонтальных швов кладки. Дома с наружными каменными стенами и внутренними железобетонными или металлическими рамами (стойками). (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).
Тип 5	Дома с кирпичными (каменными) стенами комплексной конструкции. (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).
Тип 6	Дома каркасные из сборного и монолитного железобетона со стеновым заполнением, не участвующим в работе на сейсмические воздействия. (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).
Тип 7	Дома каркасные с диафрагмами и ядрами жесткости из сборного и монолитного железобетона. Дома крупнопанельные и объемно-блочные на сварке закладных деталей без замоноличивания стыков. (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).
Тип 8	Дома крупнопанельные и объемно-блочные на сварке арматурных выпусков с замоноличиванием стыков. Дома со стенами из монолитного железобетона. (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).
Тип 9	Дома в металлоконструкциях с легким стеновым заполнением. (Расчетная сейсмичность 7, 8, 9 баллов).

Как видно из приведенной таблицы, некоторые из этих девяти типов зданий содержат подтипы в зависимости от их конструктивных особенностей и уровня расчетной сейсмичности в баллах. Здесь под расчетной сейсмичностью следует понимать уровень сейсмической опасности, в соответствии с которым проектируется здание и разрабатываются соответствующие антисейсмические мероприятия (АСМ).

Первые три типа относятся к зданиям, построенным без учета расчетной сейсмичности, что подразумевает их особую уязвимость и, соответственно, потенциально повышенный риск, учитывая высокий уровень сейсмической опасности на территории Туркменистана. Остальные типы зданий (с 4 по 9) рассматриваются с различным уровнем антисейсмических мероприятий, соответствующим опасности 7, 8 и 9 баллов.

Таким образом, в общей сложности, учитывая 9 основных конструктивных типов зданий и все дополнительные подтипы, можно констатировать, что в терминах сейсмической уязвимости данная классификация охватывает 22 типа, в том числе: 1а, 1б, 2, 3, 4(7), 4(8), 4(9), 5(7), 5(8), 5(9), 6(7), 6(8), 6(9), 7(7), 7(8), 7(9), 8(7), 8(8), 8(9), 9(7), 9(8), 9(9), где в скобках указан уровень расчетной (проектной) сейсмостойкости зданий.

В дополнение к классификации типов по конструктивному решению в Приложении 5 СНТ 2.01.08-2020 содержатся оценки повреждаемости для всех перечисленных типов и подтипов зданий. Эти оценки показаны в таблице 3.7. Для правильной интерпретации приведенных в этой таблице данных, необходимо понимать, что значения в каждой строке представляют собой распределения вероятностей возникновения повреждений различной степени (от 0 до 5) при указанном уровне сейсмической интенсивности (6, 7, 8, 9 и более 9 баллов). Соответственно, суммарная вероятность в каждой строке составляет 100%. Другими словами, приведенные оценки степени повреждения различных типов зданий при различном уровне сейсмической интенсивности представляют собой не что иное, как матрицы вероятности повреждения (традиционный формат которой показан в таблице 3.4).

Как можно видеть из таблиц 3.6 и 3.7, типы зданий в классификации СНТ 2.01.08–2020 ранжированы, с учётом возрастания уровня сейсмостойкости (то есть по уменьшению их сейсмической уязвимости). Заслуживает внимания тот факт, что количественный диапазон оценок сейсмостойкости (а значит и сейсмической уязвимости) всей совокупности рассмотренных репрезентативных типов зданий в Туркменистане довольно широк.

Таблица 3.7.

Оценка степени повреждения зданий

Тип здания	Процент поврежденных зданий по степеням повреждения (классификация повреждения по шкале MSK-64)					
	0	1	2	3	4	5
Интенсивность 6 баллов						
1a	0	37,5	50	10	2	0,5
1б	10	50	37,5	2	0,5	0
2	37,5	50	10	2	0,5	0
3	50	37,5	10	2	0,5	0
4(7)	87,5	10	2	0,5	0	0
5(7), 4(8)	97,5	2	0,5	0	0	0
6(7), 5(8), 4(9)	97,5	2	0,5	0	0	0
7(7), 6(8), 5(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
8(7), 7(8), 6(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(7), 8(8), 7(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(8), 8(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
Интенсивность 7 баллов						
1a	0	0,5	37,5	50	10	2
1б	0	10	50	37,5	2	0,5
2	0	37,5	50	10	2	0,5
3	0	50	37,5	10	2	0,5
4(7)	37,5	50	10	2	0,5	0
5(7), 4(8)	87,5	10	2	0,5	0	0
6(7), 5(8), 4(9)	87,5	10	2	0,5	0	0
7(7), 6(8), 5(9)	97,5	2	0,5	0	0	0
8(7), 7(8), 6(9)	97,5	2	0,5	0	0	0
9(7), 8(8), 7(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(8), 8(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(9)	99,5	0,5	0	0	0	0

продолжение таблицы 3.7.

Тип здания	Процент поврежденных зданий по степеням повреждения (классификация повреждения по шкале MSK-64)					
	0	1	2	3	4	5
Интенсивность 8 баллов						
1a	0	0	0,5	37,5	50	12
1б	0	0,5	10	50	37,5	2
2	0	0,5	37,5	50	10	2
3	0	0,5	50	37,5	10	2
4(7)	0	37,5	50	10	2	0,5
5(7), 4(8)	37,5	50	10	2	0,5	0
6(7), 5(8), 4(9)	50	37,5	10	2	0,5	0
7(7), 6(8), 5(9)	60	37,5	2	0,5	0	0
8(7), 7(8), 6(9)	87,5	10	2	0,5	0	0
9(7), 8(8), 7(9)	97,5	2	0,5	0	0	0
9(8), 8(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
9(9)	99,5	0,5	0	0	0	0
Интенсивность 9 баллов						
1a	0	0	0	0,5	50	49,5
1б	0	0	0	30	50	20
2	0	0	0,5	37,5	50	12
3	0	0	0,5	50	37,5	12
4(7)	0	0,5	37,5	50	10	2
5(7), 4(8)	0	37,5	50	10	2	0,5
6(7), 5(8), 4(9)	0	50	37,5	10	2	0,5
7(7), 6(8), 5(9)	37,5	50	10	2	0,5	0
8(7), 7(8), 6(9)	50	37,5	10	2	0,5	0
9(7), 8(8), 7(9)	87,5	10	2	0,5	0	0
9(8), 8(9)	97,5	2	0,5	0	0	0
9(9)	99,5	0,5	0	0	0	0

продолжение таблицы 3.7.

Тип здания	Процент поврежденных зданий по степеням повреждения (классификация повреждения по шкале MSK-64)					
	0	1	2	3	4	5
Интенсивность более 9 баллов						
1а	0	0	0	0	0,5	99,5
1б	0	0	0	0,5	20	79,5
2	0	0	0	0,5	37,5	62
3	0	0	0	0,5	50	49,5
4(7)	0	0	0,5	37,5	50	12
5(7), 4(8)	0	0,5	37,5	50	10	2
6(7), 5(8), 4(9)	0	0,5	50	37,5	10	2
7(7), 6(8), 5(9)	0	10	50	37,5	2	0,5
8(7), 7(8), 6(9)	0	37,5	50	10	2	0,5
9(7), 8(8), 7(9)	37,5	50	10	2	0,5	0
9(8), 8(9)	50	37,5	10	2	0,5	0
9(9)	87,5	10	2	0,5	0	0

Сравнительный анализ представленных оценок повреждаемости показывает, что многие здания наиболее уязвимых типов (1а, 1б, 2 и 3) уже при шести-семибалльной сейсмической интенсивности могут получать значительные повреждения, а отдельные здания этих типов могут быть разрушены. В то же время здания с антисейсмическими мероприятиями предназначены выдержать гораздо более сильные землетрясения без значительных повреждений (с ожидаемой степенью повреждения менее 3).

3.6. Построение функций сейсмической уязвимости

Функции сейсмической уязвимости строятся с использованием матриц вероятности повреждения, определяющих вероятность возникновения различных состояний поврежденного здания (степеней повреждения). Необходимая для этого информация может быть получена на основе анализа макросейсмических данных при прошлых землетрясениях, расчетным путем (с помощью компьютерного моделирования) или на основе экспертных оценок. Во всяком случае, для каждого типа здания оценивается вероятность повреждения различной степени d_i (для всего рас-

смаатриваемого диапазона повреждений) при различном уровне сейсмической интенсивности I (для всех рассматриваемых уровней интенсивности).

Кроме этого, для построения функций уязвимости необходимы также стоимостные оценки потерь (модели потерь), связывающие величину удельного ущерба с каждым из рассматриваемых дискретных состояний повреждения.

В научно-технической литературе можно найти различные зависимости (модели потерь), предлагаемые различными авторами для оценки потерь вызванных повреждением зданий.

Следует отметить, соотношения, связывающие степень повреждения и уровень вероятных потерь, являются специфическими для различных типов зданий (в том числе, имея в виду их различные механизмы повреждения, не говоря о том, что они могут зависеть от особенностей региональной строительной практики). Тем не менее в большинстве случаев на практике применяются осредненные модели потерь.

В качестве примера используем модели потерь, предложенные в работе (Туагунов et al., 2012) и основанные на классификации повреждений каменных и железобетонных зданий (Табл. 3.1 и 3.2). Эти оценки прямых экономических (материальных) потерь, соответствующие различным степеням повреждения (от 0 до 5) и выраженные в процентах от первоначальной стоимости рассматриваемого здания, представлены в нижеследующей таблице (Табл. 3.8).

Таблица 3.8.

Оценки прямых потерь, связанных с повреждением зданий

Степень повреждения здания	$d = 0$	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$
Вероятный диапазон прямого ущерба (%)	0	0–1	1–20	20–60	60–100	100
Среднее значение прямого ущерба CDF (%)	0	0,5	10	40	80	100

Следует подчеркнуть, что представленные в таблице оценки включают в себя только прямые потери, то есть потери непосред-

ственно связанные с повреждением строительных конструкций. Другие виды возможных потерь, такие, например, как потери, связанные с повреждением имущества, находящегося в зданиях или косвенные экономические потери, вызванные (временным или полным) прекращением функционирования поврежденного объекта, должны рассматриваться отдельно.

Оценка среднего удельного ущерба для различных уровней сейсмической интенсивности (балльности) может быть получена с помощью матриц вероятности повреждений и принятой модели потерь по следующей формуле.

$$MDR_I = \sum_{i=1}^n P[d_i | I] \times CDF_i / 100\%,$$

где MDR_I – величина среднего удельного ущерба (Mean Damage Ratio) при уровне интенсивности I .

$P[d_i | I]$ – вероятности возникновения степени повреждения d_i при уровне интенсивности I , определяемые в соответствии матрицами вероятности повреждения.

CDF_i – центральное значение прямого ущерба (Central Damage Factor), соответствующее данной степени повреждения d_i , определяемое в соответствии с принятой моделью потерь (Таблица 3.8).

Вычисления должны производиться для всего диапазона возможных степеней повреждений d (от 0 до 5) посредством суммирования произведений среднего значения ожидаемого ущерба для каждой степени повреждения и соответствующих условных вероятностей возникновения данной степени повреждения при каждом уровне сейсмической интенсивности.

В соответствии с этой формулой были выполнены расчеты вероятного удельного ущерба для всех типов зданий, перечисленных в СНТ 2.01.08-2020, для различных уровней сейсмической интенсивности (от VI до X баллов).

Полученные количественные оценки среднего ущерба при различной сейсмической интенсивности для всех 22 рассмотренных типов зданий представлены на рис.3.3, где показана зависимость величины ожидаемого среднего удельного ущерба от уровня сейсмической интенсивности.

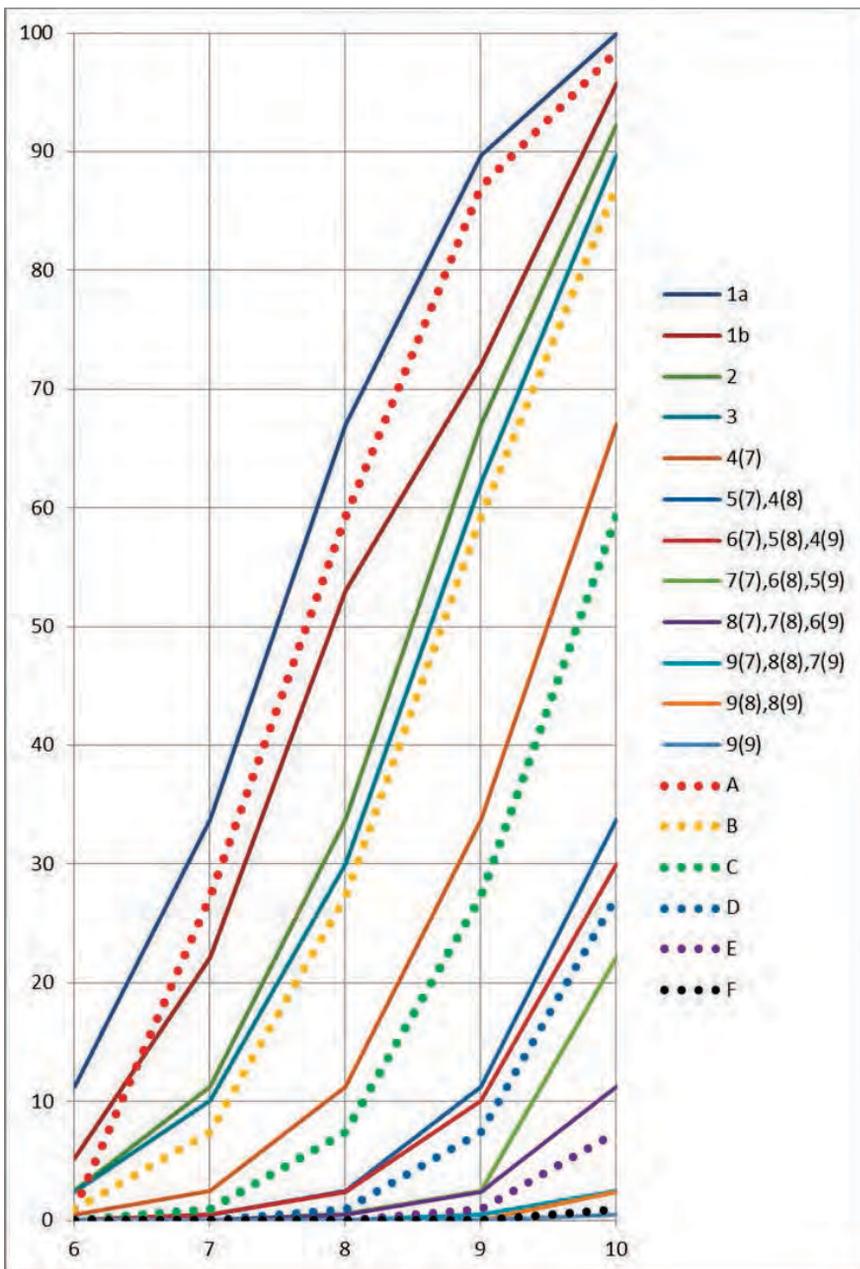


Рис. 3.3. Сравнение функций уязвимости для типов зданий по СНТ 2.01.08-2020 и функций уязвимости для классов EMS-98

На горизонтальной оси показаны значения сейсмической интенсивности (в баллах), а по вертикали откладываются соответствующие оценки ожидаемого ущерба (в процентах от полной стоимости зданий). Функции сейсмической уязвимости для всех представительных типов зданий в Туркменистане показаны сплошными линиями.

Для сравнения там же (пунктирными линиями) показаны функции сейсмической уязвимости для всех шести классов шкалы EMS-98, представленных в таблице 3.3.

Совместное рассмотрение матриц вероятности повреждения для зданий, соответствующих шести различным классам сейсмической уязвимости EMS-98, и для типов зданий по классификации СНТ 2.01.08-2020 дает возможность сопоставить и сравнить оценки их повреждаемости. Такое сопоставление может оказаться полезным для моделирования сейсмической уязвимости застроенной городской среды при отсутствии паспортизации зданий либо неполноты ее данных.

Таким образом, сравнивая функции сейсмической уязвимости для рассмотренных 22 типов зданий по СНТ 2.01.08-2020 с функциями уязвимости для шести классов EMS-98 (Рис. 3.3), можно определить их примерное соответствие, как показано в таблице 3.9.

Таблица 3.9

**Сопоставление типов зданий СНТ 2.01.08-2020
и классов сейсмической уязвимости EMS-98**

Тип зданий по классификации СНТ 2.01.08-2020	Класс EMS-98
1a, 1b	A
2, 3	B
4(7)	C
5(7), 4(8), 6(7), 5(8), 4(9), 7(7), 6(8), 5(9)	D
8(7), 7(8), 6(9)	E
9(7), 8(8), 7(9), 9(8), 8(9), 9(9)	F

3.7. Прямая и обратная задача сейсмостойкости

Говоря о сейсмостойкости зданий следует различать прямую и обратную задачи.

При проектировании новых зданий, строящихся в сейсмических районах, инженеры-проектировщики решают прямую задачу сейсмостойкости. Она заключается в обеспечении достаточного уровня несущей способности здания путем правильного подбора геометрических и физико-механических характеристик несущих конструкций (в том числе, профиль и размеры поперечных сечений, допустимые длины конструктивных элементов, их гибкость, прочностные свойства материалов, процент армирования и другие характеристики) и узлов их соединений при расчетном уровне сейсмических воздействий. В качестве исходной информации проектировщики должны учитывать оценки сейсмической опасности строительных площадок, включая интенсивность сейсмических воздействий, а также их повторяемость. Эти параметры опасности, как правило, в обобщенном виде указываются в национальных строительных нормах и уточняются по картам микрорайонирования либо по результатам инженерно-сейсмологических исследований на выбранной площадке строительства.

Обратную задачу сейсмостойкости приходится решать при сейсмической оценке существующих зданий и сооружений. Проблема состоит в том, что за время эксплуатации зданий в их конструкциях могут накапливаться повреждения, за счет техногенных или природных факторов могут изменяться свойства оснований, что может привести к повышению сейсмической уязвимости, а значит снижению сейсмостойкости. Кроме того за время, прошедшее после строительства этого объекта, на основе полученных новых знаний о сейсмотектонике района или уточняющих исследований по сейсмическому районированию, могут измениться оценки сейсмической опасности на данной площадке.

Таким образом, целью обратной задачи является проверка достаточности фактического (актуального) уровня несущей способности конструкций здания при расчетном (актуальном)

уровне сейсмических воздействий. Если по результатам обследования текущего состояния здания будет выявлено, что сейсмические нагрузки (seismic demand) превышают его сейсмостойкость (seismic capacity), то есть если имеет место так называемый «дефицит сейсмостойкости», такое здание подлежит либо конструктивному усилению, либо сносу.

3.8. Проектирование и расчеты сейсмостойких зданий

В многочисленных исследованиях, посвященных анализу поведения различных типов зданий и сооружений при землетрясениях, а также вопросам сейсмостойкого строительства (см., например, Кириков, 1992, Курмаев, 1989, Bachmann, 2002, Meskouris, 2011 и др.), сформулированы основные принципы обеспечения их сейсмостойкости, большинство из которых заложены в современные нормы проектирования. Ниже перечислены некоторые из этих принципов, в частности:

- Выбор строительных площадок, благоприятных в сейсмическом отношении (на основе карт сейсмического районирования).
- Применение материалов и конструктивных схем, обеспечивающих наименьшие значения сейсмических нагрузок на здания и сооружения.
- Применение симметричных объемно-планировочных решений, обеспечивающих равномерное распределение сейсмических нагрузок.
- Обеспечение однородности, симметричности, регулярности и равномерности распределения вертикальных конструкций в плане, а также их непрерывности по высоте.
- Равномерное распределение масс и жесткостей в плане и по высоте.
- Выбор конструктивных схем, приводящих к снижению усилий в элементах конструкций или ограничению их перемещений при сейсмических воздействиях.

- Применение конструктивных схем, обеспечивающих пространственное восприятие сейсмических воздействий в любом направлении и предотвращающих возникновение крутильных колебаний.

- Выполнение конструктивных мероприятий, обеспечивающих развитие в элементах конструкций пластических деформаций при обеспечении общей устойчивости здания.

- Обеспечение устойчивости и геометрической неизменяемости конструктивных систем при развитии в них пластических деформаций.

- Предпочтительное применение многократно статически неопределимых систем.

- Обеспечение совместной работы конструктивных элементов и их реакции на сейсмические воздействия как единой конструктивной системы.

- Обеспечение равной сопротивляемости конструктивной системы по ее главным горизонтальным направлениям.

- Проведение мероприятий, обеспечивающих сохранность несущих конструкций, локальное разрушение или недопустимое деформирование которых способно вызвать обрушение здания или сооружения или может представлять угрозу для безопасности людей.

- Обеспечение надзора за качеством проектирования и качеством выполнения строительно-монтажных работ при полном соблюдении проектных решений.

Пренебрежение этими принципами может привести к значительному повышению сейсмической уязвимости зданий, то есть к снижению его сейсмостойкости.

Проведение расчетов на сейсмостойкость должно выполняться в соответствии с положениями действующих строительных норм. Расчетные методы могут быть либо линейными, либо нелинейными, либо статическими, либо динамическими (Fajfar, 2000, Deierlein et al., 2010, Porter et al., 2007, Rajasekaran, 2009, Мкртычев и Джинчвелашвили, 2014, Соснин, 2016, и др.).

Наиболее широкое распространение в практике сейсмостойкого проектирования имеет линейно-спектральный метод расчета, при использовании которого значения сейсмических нагрузок определяются по спектрам коэффициента динамичности (получаемым расчетным путем или определяемым по существующим нормативным документам) в зависимости от периодов и форм собственных колебаний зданий и сооружений. При этом расчетная схема здания может представляться в виде системы с распределенными массами, сосредоточенными в уровнях перекрытий, где прикладываются сейсмические нагрузки (Рис. 3.4).

Линейно-спектральный метод используется для большинства зданий и сооружений, относящихся к массовой застройке, в то время как для особо ответственных объектов рекомендуется применять динамические методы расчета. Для этого используются реальные акселерограммы землетрясений (как правило, полученные при регистрации сейсмических колебаний в данном регионе), либо синтезированные акселерограммы (также отражающие инженерно-сейсмологические особенности сейсмических колебаний площадки исследований).

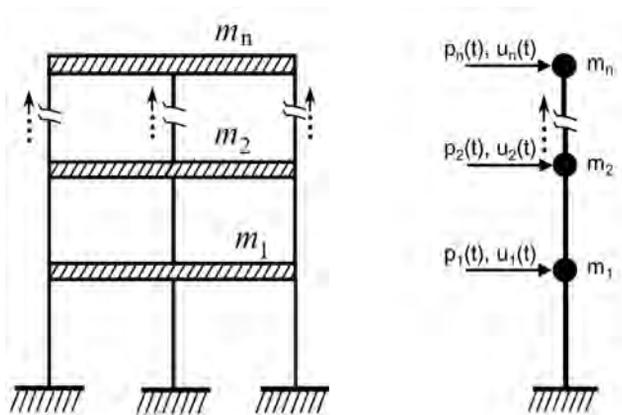


Рис. 3.4. Моделирование сооружений в виде системы с распределенными массами

При проведении динамических расчетов существующие нормы проектирования рекомендуют учитывать нелинейные

эффекты, связанные с развитием неупругих деформаций в строительных конструкциях. Однако, надо принимать во внимание, что процедура прямого нелинейного динамического расчета представляет собой очень трудоемкий и длительный процесс.

В последние годы все более широкое применение в практике сейсмостойкого проектирования, а также при оценке сейсмостойкости существующих зданий получают нелинейные методы, в том числе нелинейный статический метод (Pushover Analysis) (см, например, Булушев и др., 2016).

Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки и выбор подходящего метода должен определяться целями и задачами конкретного исследования. Все эти методы алгоритмизированы и реализованы в виде инженерно-строительного программного обеспечения, предназначенного для проведения расчетов зданий и сооружений на сейсмостойкость (например, Abaqus, ANSYS, OpenSees, ETABS, SAP2000, SeismoBuild, SeismoStruct, SOFiSTiK, STAAD.Pro, ЛИРА, ЛИРА-САПР и др.).

3.9. Сейсмическая оценка существующих зданий

Совокупность существующих методов оценки и моделирования сейсмической уязвимости зданий можно условно разделить на:

- эмпирические (основанные на анализе реального поведения различных типов зданий при прошлых землетрясениях),
- расчетные (использующие механико-математические методы моделирования зданий и сооружений),
- экспериментальные (основанные на применении разрушающих или неразрушающих методов контроля строительных конструкций и инструментальном мониторинге за поведением существующих зданий).

Кроме того применяются гибридные методы, объединяющие преимущества и возможности различных подходов.

Следующие публикации содержат обзоры исследований, посвященных вопросам оценки сейсмической уязвимости суще-

ствующих зданий и сооружений (Vamvatsikos et al., 2010, Alam et al, 2012, Gueguen, 2013, Pitilakis et al., 2014, Kishore, 2017).

Результатом количественной оценки сейсмической уязвимости зданий являются графики повреждаемости и функции уязвимости, которые предназначены, в свою очередь, для оценки вероятности повреждения зданий и оценки уровня потерь, связанных с повреждением строительных конструкций.

Методика количественного представления повреждаемости различных типов зданий при землетрясениях была представлена в 1985 году в отчете АТС-13, выполненном при поддержке Федерального агентства по управлению в чрезвычайных ситуациях США (FEMA) и основанном на анализе последствий калифорнийских землетрясений. В этом отчете были разработаны матрицы вероятности повреждений для зданий и сооружений различных типов, характерных для застройки в Калифорнии, США. Следует отметить, что матрицы вероятности повреждений в отчете АТС-13 были разработаны, основываясь на экспертных оценках поведения различных типов зданий при землетрясениях, полученных путем опроса национальных экспертов.

Несмотря на то, что результаты, представленные в отчете АТС-13, в силу региональной специфики исходных данных (в том числе, рассмотренных типов зданий и сооружений), предназначались для оценки уязвимости и риска только в Калифорнии, разработанная методика получила дальнейшее развитие во всем мире. Подобные соотношения широко применяются для количественного описания сейсмической уязвимости и для расчетов сейсмического риска и в настоящее время разрабатываются как с помощью эмпирических, так и расчетно-аналитических методов.

В последующие годы, основываясь на тех же данных, агентство FEMA разработало методику RVS (Rapid Visual Screening, FEMA 154, 155) для быстрого визуального обследования зданий существующей застройки и приближенной оценки их сейсмобезопасности.

В основу метода RVS положена система начисления очков в зависимости от конструктивных особенностей здания, а так-

же сейсмичности площадки его расположения. Инспекторы, прошедшие предварительное обучение, проводят визуальный осмотр зданий, заполняя при этом специально разработанные формуляры, в которых для разных типов зданий начисляется определенное количество очков (в зависимости от конструктивной схемы здания).

В процессе визуального осмотра здания и заполнения формуляра к этому первичному количеству очков начисляются дополнительные очки со знаком плюс (при наличии факторов, благоприятно влияющих на сейсмостойкость исследуемого здания) или со знаком минус (в случае, если в здании имеются недостатки, снижающие его сейсмостойкость, то есть повышающие его сейсмическую уязвимость). Следует отметить, что для районов с разным уровнем сейсмической опасности применяются различные формуляры.

Этот метод нацелен на выявление зданий предположительно уязвимых в сейсмическом отношении и подлежащих более детальному обследованию, то есть, если для некоторых из обследованных зданий суммарное количество начисленных очков окажется меньше критического уровня, то эти здания подлежат более тщательному обследованию профессиональными инженерами.

Методика RVS (Rapid Visual Screening) для быстрого визуального обследования зданий продолжает развиваться и соответствующие публикации FEMA 154, 155 выдержали уже три издания (1988, 2002, 2015). С помощью этой методики могут быть обследованы значительные участки городской застройки и выявлены сейсмически уязвимые здания в сравнительно короткие сроки. Однако данная методика не дает возможность количественной оценки уязвимости для последующих расчетов сейсмического риска.

Заслуживает внимания тот факт, что методика для быстрого визуального обследования, разработанная применительно к типам зданий, характерным для застройки в США, нашла применение и в других странах, например, в Турции (Ozcebe et al., 2006) и

Индии (Srikanth et al., 2010), где она была, однако, адаптирована с учетом местных особенностей строительства.

Выбор методов сейсмической оценки зданий существующей застройки во многом зависит от поставленных задач.

С одной стороны, при проведении исследований на некоторой застроенной территории, когда необходимо рассмотреть достаточно большое количество зданий в относительно короткие сроки, целесообразно использовать упрощенные методы. Эти методы, как правило, основаны на неполном (ограниченном) объеме информации и на визуальной оценке конструкций зданий и сооружений. Упрощенные методы позволяют получить приближенные оценки сейсмической уязвимости (или, наоборот, сейсмической безопасности) отдельных зданий, хотя, как было отмечено, их целью является оценка уязвимости рассматриваемой застроенной территории в целом.

С другой стороны, когда необходимо оценить фактическую сейсмостойкость отдельного здания (или провести долгосрочный мониторинг его состояния) должны применяться более сложные и комплексные подходы, в том числе с применением специального измерительного оборудования и соответствующего программного обеспечения для обработки результатов измерений и выполнения расчетов на сейсмостойкость.

Далее будут рассмотрены различные подходы, применяемых в настоящее время для оценки сейсмостойкости (сейсмической уязвимости) существующих зданий.

В соответствии с европейскими нормами (Eurocode 8), выбор методов для сейсмической оценки существующих зданий должен определяться в зависимости от уровня доступной информации о характеристиках здания, который называется уровнем знаний (Knowledge Level, KL) и определяется полнотой информации по следующим характеристикам зданий:

Геометрия. Сюда относятся геометрические характеристики исследуемой конструктивной системы, включая все ее элементы (как несущие, так и не несущие), которые могут оказать влияние на ее поведение при сейсмических воздействиях.

Конструктивные детали. Информация об армировании конструктивных элементов (включая как схему, так и процент армирования), выполнении стыков между отдельными элементами, формирующими конструктивную систему сооружения.

Материалы. Информация о физико-механических свойствах строительных материалов.

В зависимости от полноты расчетной информации, Еврокод 8 определяет три уровня знаний: (KL1) ограниченный уровень знаний; (KL2) нормальный уровень знаний; (KL3) полный уровень знаний.

Как показывает практический опыт, необходимая для расчетов информация, которую в первую очередь следует искать в проектно-конструкторской документации, часто оказывается или неполной, или неточной, или даже полностью отсутствует. Таким образом, для получения отсутствующих данных необходимо проведение натурных исследований и измерений.

Следует особо отметить, что даже в случае наличия достаточного объема расчетных данных в проектно-конструкторской документации Еврокод 8 рекомендует проведение натурных исследований для получения наиболее достоверной и актуальной информации о текущем состоянии здания.

Из представленной далее сводной таблицы (*Табл. 3.10*) видно, как существенно различаются подходы к сбору информации и оценке сейсмической уязвимости в зависимости от соответствующего уровня знаний, который определяется целями и/или рамками исследований.

Для более низкого (ограниченного) уровня знаний расчетные данные о конструктивных деталях и свойствах материалов могут быть получены с помощью выборочного натурного инспектирования или с использованием так называемого «имитационного моделирования». Под имитационным моделированием подразумевается процедура назначения параметров расчетной модели (например, прочностные свойства материалов, модуль упругости, процент армирования железобетонных конструкций и др.) в соответствии со строительными стандартами, соответствующими времени строительства исследуемого здания.

Уровни знаний соответствующие методы обследования и анализа зданий

	Уровень знаний 1	Уровень знаний 2	Уровень знаний 3
Геометрические размеры	По исходным проектным чертежам в сочетании с выборочным визуальным обследованием или по результатам полного обследования		
Конструктивные детали	С использованием имитационного моделирования , согласующегося с практикой соответствующей времени строительства, и по результатам ограниченного инспектирования на месте	По неполным исходным конструкторским чертежам в сочетании с ограниченным инспектированием на месте или по результатам расширенного инспектирования на месте	По исходным конструкторским чертежам в сочетании с ограниченным инспектированием на месте или по результатам полного комплексного инспектирования на месте
Свойства материалов	С использованием стандартных значений , согласующихся с практикой соответствующей времени строительства, и по результатам ограниченного тестирования на месте	По исходным проектным спецификациям в сочетании с ограниченными испытаниями материалов на месте или по результатам расширенного тестирования материалов на месте	По исходным отчетам испытаний материалов в сочетании с ограниченным тестированием на месте или по результатам полных комплексных испытаний материалов на месте
Методы анализа	Линейные методы анализа, статические или динамические	Линейные или нелинейные методы анализа, статические или динамические	Линейные или нелинейные методы анализа, статические или динамические

Для нормального уровня знаний требуется более детальное инспектирование строительных конструкций и частичное применение испытательных методов неразрушающего (или разрушающего) контроля.

Для полного уровня знаний, соответственно, необходимо полное комплексное натурное обследование здания и определение свойств материалов с привлечением испытательных методов контроля.

В соответствии с определенным уровнем знаний, натурное инженерное обследование каждого обследуемого здания, должно включать визуальное инспектирование зданий, включая необходимые геометрические измерения и оценку текущего состояния несущих конструкций.

Целью инспектирования является измерение геометрических параметров зданий, их несущих и ненесущих конструкций, элементов и узлов; визуальное и инструментальное выявление существующих дефектов и повреждений и их количественное описание, а также оценка актуальных физико-механических свойств материалов строительных конструкций (с применением методов неразрушающего контроля).

В ходе инспектирования здания необходимо собрать данные для построения модели здания, которая будет использована в расчетах на сейсмостойкость (см. *Табл. 3.11*).

Естественно, для моделирования могут быть использованы также конструктивные характеристики, полученные из доступной проектно-конструкторской документации, однако все проектные данные должны обязательно сравниваться с данными, полученными из натуральных измерений. Поскольку речь идет об оценке актуального состояния конструкций последним должно отдаваться предпочтение.

Процесс визуального инспектирования здания и проведения измерений целесообразно сопровождать фотографированием и эскизированием, включая как общую схему самого здания, так и его несущих конструкций. Эта информация понадобится при построении компьютерной модели здания.

Помимо измерений, направленных на получение информации о геометрических характеристиках сооружения, его конструктивных особенностях и деталях, а также свойствах строительных материалов, важным источником необходимой информации о текущем состоянии здания служат инструментальные измерения его колебаний в натуральных условиях.

Таблица 3.11.

**Данные для моделирования и расчетов
на сейсмостойкость**

NN	Основные данные, необходимые для построения расчетной модели и оценки уязвимости здания
1	Конструктивная схема и материал несущих конструкций здания
2	Общие размеры и форма здания в плане и по высоте (с указанием наличия и расположения деформационных и антисейсмических швов)
3	Наличие геометрических и/или конструктивных неоднородностей (нерегулярностей) как в плане, так и по высоте сооружения
4	Размеры и расположение несущих конструктивных элементов (стены, колонны, балки, связи, шахты, плиты)
5	Геометрические и прочностные характеристики несущих конструкций (форма поперечного сечения, процент армирования, марка и класс бетона и арматурной стали)
6	Наличие ненесущих элементов здания, которые могут повлиять на жесткость и/или распределение массы всего сооружения и их характеристики
7	Год строительства (и реконструкции) сооружения; его функциональное назначение, а также класс ответственности
8	Текущее состояние всего сооружения и его конструктивных элементов

Целью инструментально-сейсмометрических измерений является определение собственных динамических характеристик каждого здания в его текущем состоянии. Эта важная информация, с одной стороны, позволит уточнить (калибровать) расчетную компьютерную модель здания, а, с другой (при проведении периодических измерений) позволит осуществлять мониторинг состояния здания в процессе его эксплуатации (особенно после произошедших землетрясений).

Для этой цели здание оборудуется системой сейсмодатчиков и проводится краткосрочный (или, при необходимости, долгосрочный) мониторинг здания, который позволяет с помощью модального анализа определить собственные динамические характеристики сооружения, выявить и локализовать существующие уязвимости.

Модальный анализ выполняется как расчетно-аналитическим путем (с использованием численных методов и соответствующего программного обеспечения), так и на основе обработки данных, полученных экспериментально. При этом могут быть использованы как методики, использующие специальное внешнее динамическое возбуждение (так называемый экспериментальный модальный анализ, ЭМА), так и методы, основанные на обработке записей фоновых (микросейсмических) колебаний в нормальных условиях эксплуатации (так называемый, операционный модальный анализ, ОМА). Для обработки полученных данных применяются соответствующие программные обеспечения, разработанные для модального анализа конструкций, например, ARTeMIS, MACeC и др. (Reynders, 2012, Reynders et al, 2014, Rainieri et al, 2014,).

В качестве примера на рис. 3.5 представлены результаты оценки частот и форм собственных колебаний для четырехэтажной рамной конструкции, полученные с помощью программы MACeC (MACeC 3.4, 2021).

Концептуальная идея использования данного подхода основана на том, что повреждения или дефекты в здании (которые

могут возникнуть либо на стадии строительства, либо в процессе эксплуатации, например, в случае произошедших землетрясений или других природных или техногенных воздействий), даже, если они не обнаруживаются визуально, проявятся в изменении динамических характеристик конструктивной системы. Соответственно, эти изменения могут быть идентифицированы с помощью натуральных инструментальных измерений и экспериментального (или операционного) модального анализа.

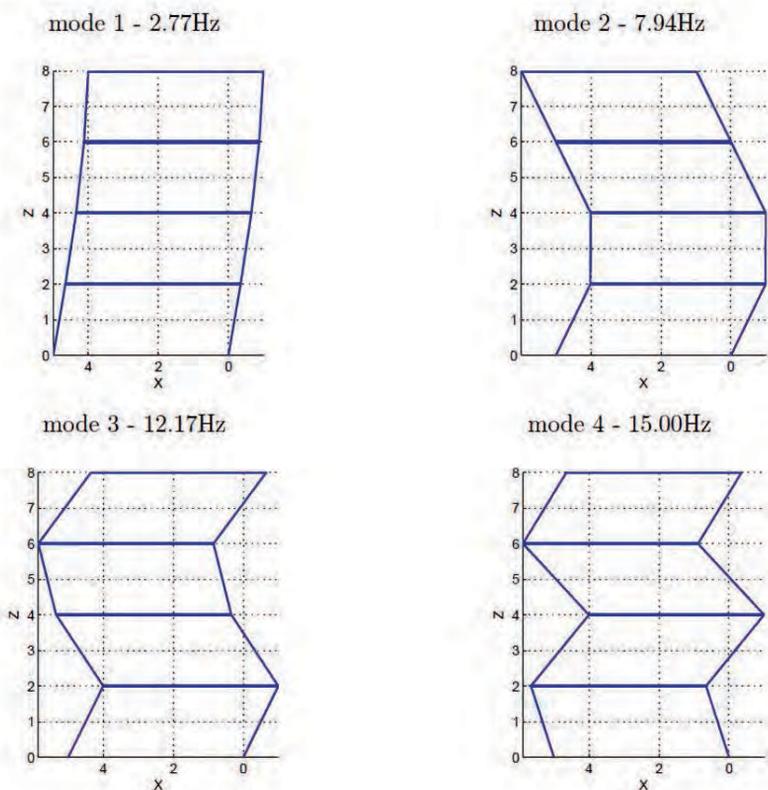


Рис. 3.5. Пример графического представления результатов операционного модального анализа с помощью программы MACES

Оценки, полученные с помощью ЭМА или ОМА, сравниваются с оценками модального анализа, полученного расчетным путем для исходной (проектной) системы, что позволяет выявить

и устранить возможные нарушения или повреждения в конструкциях зданий.

Надо отметить, что ЕМА считается менее подходящим для анализа зданий и сооружений, поскольку такие крупные объекты не могут быть обследованы в изолированных лабораторных условиях и поэтому существующие внешние помехи могут быть вполне сопоставимыми с уровнем подаваемого сигнала возбуждения и оказывать существенное влияние на результаты анализа. Поэтому для мониторинга состояния сооружений все большее распространение получают методы ОМА, основанные на анализе только выходного сигнала.

Как в научных, так и в практических целях рекомендуется проведение регулярных повторных измерений и операционного модального анализа (ОМА) в выбранных зданиях (сейсмометрический мониторинг), что особенно важно в случае после произошедших землетрясений. Это позволит своевременно идентифицировать возможные повреждения конструкций, выявляя различия в динамическом поведении конструктивной системы при сравнении частот и форм колебаний с данными предыдущих измерений.

Однако, само собой разумеется, одно лишь изменение частот не может дать точную информацию о положении, характере и степени повреждения. Поэтому точная локализация повреждений потребует проведения дополнительных исследований с применением комплекса инженерных методов (включая визуальное инспектирование) и специального оборудования.

Важно понимать, что сам по себе операционный модальный анализ не дает оценки сейсмической уязвимости или сейсмостойкости зданий и сооружений. Как уже отмечалось, результаты ОМА должны использоваться в комплексе с другими инженерными методами сейсмической оценки зданий, в частности, с расчетными методами оценки сейсмостойкости, что позволит повысить их эффективность и обеспечить достоверность полученных оценок.

Так же как и при проектировании новых зданий, расчетные методы, применяемые при сейсмической оценке существующих зданий, могут быть либо линейными, либо нелинейными, либо статическими, либо динамическими. Выбор расчетных методов анализа сооружений для оценки их сейсмостойкости также определяется в соответствии с уровнем знаний (*см. Табл.3.10*).

Таким образом, для сбора необходимой информации и получения уточненной оценки сейсмической уязвимости существующих зданий и сооружений требуются:

- Оборудование для сбора информации о геометрических характеристиках сооружения, его конструктивных элементах и свойствах материалов. При этом принцип работы инструментов для сбора информации следует ориентировать на неразрушающие методы контроля.

- Оборудование для натурного измерения колебаний с целью определения собственных динамических характеристик существующих зданий. Такое оборудование должно сопровождаться соответствующим программным обеспечением для анализа и интерпретации полученной информации.

- Программное обеспечение для проведения расчетов на сейсмостойкость. Это программное обеспечение должно обеспечивать возможность проведения как линейных, так и нелинейных, как статических, так и динамических расчетов.

В случаях, когда доступная информация о характеристиках объектов застройки ограничена и в сжатые сроки требуется произвести оценку большого количества зданий, предпочтение отдается приближенным подходам, некоторые из которых изложены ниже. Эти методы сейсмической оценки зданий (которые также можно отнести к методам быстрого визуального обследования) могут быть весьма эффективны в случаях, когда необходимо провести массовое обследование зданий существующей застройки. При этом необходимо понимать, что полученные таким образом оценки являются приближенными и при необходимости должны быть уточнены с применением более точных методов.

3.10. Приближенные методы сейсмической оценки зданий

Оценка здания по конструктивному решению.

Приближенная оценка сейсмостойкости зданий может быть получена с использованием положений нормативного документа СНТ 2.01.08-2020, совместно рассматривая конструктивный тип здания (Табл. 3.6), его вероятную повреждаемость (Табл. 3.7) и расчетную сейсмичность площадки его расположения.

Для уточнения расчетной сейсмичности площадок необходимо дополнительно учитывать локальные грунтовые условия. При необходимости для этого следует провести инженерно-сейсмологические исследования на площадке расположения здания. В общем случае, может быть использована карта сейсмического микрорайонирования (СМР).

Таким образом, приближенная оценка повреждаемости для рассматриваемого здания может быть получена следующим образом. Сначала по таблице 3.6 определяется конструктивный тип здания, затем, в зависимости от расчетной интенсивности, соответствующей уровню сейсмической опасности на площадке его расположения, по таблице 3.7 определяется вероятность возникновения повреждений различной степени. Далее, с помощью представленной ниже таблицы 3.12 (СНТ 2.01.08-2020), можно получить приближенную оценку сейсмостойкости для этого здания, характеризуя его как сейсмобезопасное, сейсмоуязвимое или сейсмоопасное.

Очевидно, что данный метод позволяет получить только осредненную (достаточно приближенную) оценку сейсмостойкости здания и его вероятной повреждаемости, поскольку здесь не принимаются во внимание дополнительные факторы, влияющие на сейсмическую уязвимость каждого индивидуального строительного объекта. Для получения уточненных оценок необходимо собрать дополнительные данные об актуальном состоянии здания, в том числе провести его натурное обследование.

**Оценка сейсмостойкости зданий
по конструктивному решению (СНТ 2.01.08-2020)**

Сумма степеней повреждения	Суммарный процент поврежденных зданий по степеням повреждения	Оценка сейсмостойкости типов зданий для заданной интенсивности землетрясения
Нет повреждений (0) + Легкие повреждения (1)	$\geq 50\%$	Сейсмобезопасные
Умеренные повреждения (2) + Тяжелые повреждения (3)	$\geq 50\%$	Сейсмоуязвимые
Разрушения (4) + Обвалы (5)	$\geq 50\%$	Сейсмоопасные

Оценка здания по классификации уязвимости.

Далее рассмотрим другой, также приближенный метод сейсмической оценки зданий, который основан на использовании классификации уязвимости Европейской Макросейсмической Шкалы (EMS-98).

Классификация сейсмической уязвимости EMS-98, показанная в Таблице 3.3, представляет собой ранжирование различных типов зданий в зависимости от их конструктивных характеристик и особенностей, определяющих их поведение и повреждаемость при землетрясениях. Как можно видеть из этой таблицы, класс сейсмической уязвимости зависит, в первую очередь, от материала несущих конструкций, конструктивной схемы здания и уровня антисейсмических мероприятий. Вместе с тем эта классификация позволяет принимать во внимание существующие неопределенности, связанные с дополнительными характеристиками здания и факторами, которые могут повлиять на их сейсмическую уязвимость и повреждаемость при землетрясениях. Наличие тех или иных факторов может быть выявлено при обследовании существующих зданий. Соответственно, их учет по-

зволит получить уточненную оценку класса сейсмической уязвимости зданий и прогнозировать их поведение и повреждаемость при землетрясениях.

При сейсмической оценке здания, в первую очередь, исходя из материала несущих конструкций и конструктивного типа зданий, по таблице 3.3 определяется наиболее вероятный класс уязвимости, обозначенный кружком. Далее, с учетом доступной информации, полученной из проектно-конструкторской документации и/или натурного обследования, рассматривается возможный диапазон изменения класса уязвимости (вероятный диапазон показан сплошной линией, в то время как менее вероятный диапазон показан штриховой линией).

В качестве примера, отметим, что конструктивная нерегулярность здания (использование разнородных материалов в несущих конструкциях) или его геометрическая нерегулярность (сложная форма в плане или по высоте, входящие углы, в которых возможна концентрация напряжений, отсутствие антисейсмических швов в протяженных зданиях, наличие гибкого этажа) могут привести к повышению его сейсмической уязвимости.

Другой возможной иллюстрацией повышения сейсмической уязвимости могут служить очень большие проемы (например, оконные) в несущих стенах кирпичного здания, которые (при отсутствии надежного обрамления) могут быть причиной их ослабления и разрушения при сейсмических воздействиях.

При обследовании здания, обязательно следует учитывать актуальное техническое состояние исследуемого объекта, принимая во внимание все возможные повреждения и/или модификации несущих конструкций, имевшие место в период его эксплуатации.

При наличии исходной документации важно проверить соответствие существующей и проектной схемы здания и, в случае выявления недостатков по материалам или по выполненным строительным работам, также принять их во внимание. Все выявленные недостатки могут служить основанием для повышения сейсмической уязвимости здания (в диапазоне классов, указанном в таблице 3.3).

Как можно понять из вышесказанного, анализ всех дополнительных факторов, может потребовать определенного опыта и специальной инженерно-строительной подготовки от исследователей.

После сбора и анализа полученной информации об исследуемом здании, первоначальный класс сейсмической уязвимости (отмеченный кружком) может быть уточнен с учетом всех дополнительных факторов.

Если выявлены факторы, которые могут повлиять на уязвимость, то оценки могут быть изменены в пределах, показанных сплошной линией. Если выявлено много факторов, в том числе критических, оценки уязвимости могут быть изменены в пределах, показанных штриховой линией. С учетом этих изменений определяется уточненный класс уязвимости здания. Отметим, что, если дополнительная информация о характеристиках здания отсутствует, то зданию, как правило, присваивается первоначальный (как наиболее вероятный) класс уязвимости.

После уточнения класса уязвимости необходимо оценить так называемый инженерный риск (риск повреждаемости), с помощью представленных ниже графиков повреждаемости для различных классов сейсмической уязвимости от А до F (Рис. 3.6). Представленные графики дают возможность приближенно оценить повреждаемость зданий различных классов уязвимости при различном уровне сейсмической интенсивности.

В качестве примера рассмотрим оценку повреждаемости зданий классов В и С при девятибалльной сейсмической интенсивности. Как видно из рис.3.6, при этой интенсивности для зданий класса В вероятный уровень повреждения превышает третью степень, тогда как для класса С при этом же уровне интенсивности степень повреждения меньше 3.

Как известно, пороговым значением «приемлемости» инженерного риска считается третья степень повреждения конструкций, при повреждениях выше которой возникает повышенная вероятность гибели людей.

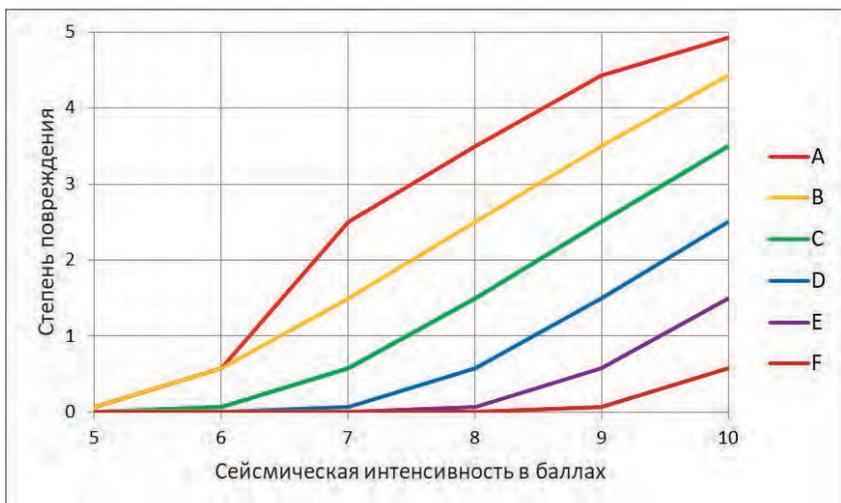


Рис. 3.6. Оценки повреждаемости классов сейсмической уязвимости

Таким образом, сравнивая полученные оценки повреждаемости для обследованных зданий можно сделать вывод об уровне инженерного риска для каждого из них. Если оценки повреждаемости окажутся ниже третьей степени, уровень риска можно считать приемлемым. Если же окажется, что для каких-то зданий ожидаемая степень повреждения окажется равной или выше третьей степени, это означает, что уровень риска повышенный. В этом случае необходимо провести дополнительное (более полное и детальное) инженерное обследование здания по уточнению его фактической сейсмостойкости.

Как было отмечено, оба вышеописанных метода являются приближенными, но, вместе с тем, они могут дать ориентировочную оценку сейсмостойкости рассматриваемого объекта. С одной стороны, неоспоримым преимуществом первого метода является рассмотрение конструктивных схем, непосредственно относящихся к строительной практике в данном конкретном регионе. С другой стороны, хотя второй подход является более общим, его явное преимущество заключается в том, что он позволяет учесть дополнительные факторы, влияющие на сейсмическую уязвимость зданий в его актуальном состоянии.

На практике рекомендуется использовать эти два метода в качестве дополнения один к другому.

При сейсмической оценке зданий существующей застройки необходимо принимать во внимание период строительства обследуемых зданий и оценку расчетной сейсмичности территории, соответствующую тому времени. Это позволит идентифицировать возможный дефицит сейсмостойкости существующих зданий более старой застройки в случае несовпадения старых и новых (уточненных) оценок сейсмической опасности на разных версиях карт сейсмического районирования.

Так называемый «дефицит сейсмостойкости» определяется как разница между актуальной оценкой расчетной сейсмичности площадки расположения здания и фактическим уровнем сейсмостойкости здания (оцениваемой в баллах).

Российскими специалистами (Клячко и др., 2009, Кофф и др., 2009) предложена процедура факторно-аналитической оценки сейсмостойкости здания на основе определения суммарного дефицита сейсмостойкости, который определяется рядом факторов, включая, в частности:

- дефицит сейсмостойкости по причине изменения исходной и/или расчетной сейсмичности территории и/или норм проектирования за время существования объекта;
- повреждения конструкций в результате перенесенных сильных землетрясений;
- низкий уровень качества строительства;
- несоблюдение правил эксплуатации здания и пр.

Как легко заметить, все ранее рассмотренные нами факторы, влияющие на сейсмическую уязвимость здания, могут внести свой вклад в суммарную величину дефицита сейсмостойкости.

Подход, основанный на оценке дефицита сейсмостойкости зданий, также может использоваться для приближенной оценки их фактической сейсмостойкости (сейсмобезопасности) в качестве дополнения к другим методам, рассмотренным выше.

Полученные оценки сейсмической уязвимости могут служить основанием для принятия решений по дальнейшей судьбе рассматриваемых зданий (их усилению или сносу).

3.11. Оценка сейсмической уязвимости застроенных территорий

Оценка сейсмической уязвимости застроенных территорий представляет собой комплексную инженерную задачу, включающую сбор и анализ данных о типах существующих зданий, их архитектурно-планировочных и конструктивных характеристиках и других факторах определяющих сейсмическую уязвимость и риск. При оценке уязвимости городских территорий, которые, как правило, застроены разными типами зданий, необходимо учитывать как состав застройки, который может существенно различаться в разных районах города, так и пространственное распределение разных типов зданий.

Эффективным инструментом для оценки и моделирования уязвимости является паспортизация застройки, которая обычно представляется в типах зданий. Базы данных по паспортизации объектов являются основой для пространственной количественной оценки сейсмической уязвимости и сейсмического риска. Наличие паспортизации дает возможность количественного определения содержания разных типов зданий в разных районах города.

Традиционно паспорт каждого здания содержит информацию:

- Адрес и/или координаты объекта.
- Наименование (функциональное назначение) объекта.
- Год постройки здания.
- Вид проекта (индивидуальный или номер типового проекта).
- 5. Расчетная сейсмичность площадки строительства (на период возведения объекта).
- Размеры здания (длина, ширина, высота).
- Этажность.
- Форма здания в плане (простая, сложная).
- Конфигурация здания по высоте (наличие геометрических нерегулярностей).

- Наличие деформационных или антисейсмических швов (разрезка здания на отсеки).
- Наличие подвала.
- Наличие и уровень антисейсмических мероприятий.
- Конструктивная схема и материал несущих конструкций.
- Конструкция и материал перекрытий.
- Тип фундаментов.
- Количество квартир в здании.
- Среднее количество людей в здании (в дневное и ночное время).

Принимая во внимание, что территориальная оценка сейсмической уязвимости, как правило, охватывает обширные территории с большим количеством строительных объектов, применение ресурсоемких сложных и высокоточных методов для оценки сейсмостойкости каждого элемента застройки экономически нецелесообразно и практически невозможно. Поэтому для этих целей разрабатываются и применяются упрощенные методы, позволяющие получить приближенную оценку уязвимости зданий и сооружений с меньшими затратами и, что особенно важно, в относительно короткие сроки.

Методология территориального подхода к оценке опасности, уязвимости и риска часто основана на том, что в рамках крупномасштабных территориальных исследований объектом рассмотрения являются не отдельные здания и сооружения, а застроенные участки территорий. В зависимости от масштаба рассматриваемой задачи такими объектами могут являться целые населенные пункты (на уровне страны или региона) или их части, например, районы или кварталы (на уровне города), которые и служат ячейками пространственной расчетной сетки.

Для этих целей в последние годы все более широкое применение получают ГИС-технологии, которые являются эффективным инструментом для решения задач пространственного анализа и картирования природных и техногенных опасностей и их взаимодействия с элементами градостроительной среды, в том числе при решении задач оценки и картирования (районирования) сейсмического риска.

Паспорт здания/сооружения № _____

1 Адрес:			
Велаят	<input type="text"/>	Микрорайон	<input type="text"/>
Город	<input type="text"/>	Улица	<input type="text"/>
Этпаш	<input type="text"/>	Дом №	<input type="text"/>
Жилой комплекс	<input type="text"/>	Примечание	<input type="text"/>
2 Наименование здания/сооружения (в именительном падеже):			
<input type="checkbox"/> образование	<input type="checkbox"/> больница	<input type="checkbox"/> учрежд./предпри.	<input type="checkbox"/> жилой дом <input type="checkbox"/> особо опасные
<input type="checkbox"/> школа	<input type="checkbox"/> поликлиника	<input type="checkbox"/> культурный	<input type="checkbox"/> коммун. хозяйство Подгруппа <input type="text"/>
<input type="checkbox"/> детский сад	<input type="checkbox"/> спорт	<input type="checkbox"/> торговый центр	<input type="checkbox"/> промышленное Дополн. <input type="text"/>
Ведомственная принадлежность: <input type="text"/>			
Эксплуатирующая организация: <input type="text"/>			
Наличие проекта: <input type="checkbox"/> Есть <input type="checkbox"/> Нет Год постройки <input type="text"/> Примечание <input type="text"/>			
3 Объемно-планировочное решение:			
Длина (м)	<input type="text"/>	Кол. этажей	<input type="text"/>
Ширина (м)	<input type="text"/>	Кол. квартир	<input type="text"/>
Высота (м)	<input type="text"/>	Подвал	<input type="text"/>
Кол. блоков	<input type="text"/>	Тех. этаж	<input type="text"/>
		<input type="checkbox"/> "Г" <input type="checkbox"/> прямоугольн.	Дополнительно: <input type="text"/>
		<input type="checkbox"/> "Г" <input type="checkbox"/> круг	<input type="text"/>
		<input type="checkbox"/> "П" <input type="checkbox"/> сложной	<input type="text"/>
		<input type="checkbox"/> кроме указанных	<input type="text"/>
4 Конструктивное решение (использов. материала) Техническое состояние (по внешним признакам):			
Фундамент:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Несущие вертикальн.:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Перекрытие:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Стены/Перегородки:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Лестница:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Кровля:	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Примечание (допол.):	<input type="text"/>	Вывод (в целом): <input type="text"/>	
5 Тип классификации зданий по конструктивному решению (СПТ 2.01.08-2020, Приложение 5)			
<input type="checkbox"/> 1-ый	<input type="checkbox"/> 2-ой	<input type="checkbox"/> 3-ий	<input type="checkbox"/> 4-ый
<input type="checkbox"/> 5-ый	<input type="checkbox"/> 6-ой	<input type="checkbox"/> 7-ой	<input type="checkbox"/> 8-ой
<input type="checkbox"/> 9-ый	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6 Сейсмичность площадки (баллы)		7 Проектная сейсмичность (баллы)	
<input type="checkbox"/> 7 бал	<input type="checkbox"/> 8 бал	<input type="checkbox"/> 7 бал	<input type="checkbox"/> 8 бал
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 9 бал	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 9 бал
8 Оценка в зависимости от тех. состояния по внешним признакам и по констр. решению:			
<input type="checkbox"/> сейсмобезопасные <input type="checkbox"/> сейсмоуязвимые <input type="checkbox"/> сейсмоопасные <input type="checkbox"/> требуется дополнительное обслед.			
Заполнитель паспорта:		Заполняется со стороны пользователя или баланс содержателя:	
Фамилия:	<input type="text"/>	Сведения о проводимой реконструкции и капитальных ремонтах:	
Имя:	<input type="text"/>		
Учреждение:	<input type="text"/>		
Должность:	<input type="text"/>		
Подпись	Дата: <input type="text"/>	Сметная стоимость на настоящее время:	<input type="text"/>
		Решение о дальнейшей эксплуатации:	

Рис. 3.7. Образец паспорта здания

При территориальном подходе вся исследуемая территория разбивается на ячейки (например, в соответствии с сеткой административных границ), для которых определяются необходимые расчетные параметры (в том числе, опасность, уязвимость, ценности) и для которых производится оценка ущерба при землетрясениях. Поскольку в пределах ячеек могут находиться здания различных типов, для каждой ячейки определяются осредненные параметры уязвимости (в зависимости от представительства каждого типа зданий).

Разумеется, в случае применения более мелкой расчетной сетки может быть достигнута более высокая точность результатов, однако надо понимать, что повышение точности всегда сопряжено с необходимостью получения более детальной информации и проведения более детальных исследований, что, в свою очередь связано с дополнительными временными и финансовыми затратами.

Одной из основных задач в рамках территориального подхода является композиционное моделирование уязвимости застройки для каждой из расчетных ячеек, имея в виду процентное содержание зданий, соответствующих различным типам зданий (классам уязвимости). Необходимая для этого информация может быть получена по данным проведенной паспортизации или (при отсутствии таковой) с помощью визуального обследования существующей застройки.

Поскольку композиционный состав по типам зданий на различных участках исследуемой территории может быть весьма неоднородным, для сравнительного анализа сейсмической уязвимости различных участков можно использовать средний показатель уязвимости (Mean Vulnerability Ratio, MVR) (Рис. 3.8).

Численное значение этого вспомогательного параметра определяется следующим образом. Каждому из шести классов сейсмической уязвимости EMS-98 присваивается численное значение от 1 (класс F) до 6 (класс A), что имеет смысловое соответствие с возрастанием уязвимости зданий от наименее уязвимого класса F до наиболее уязвимого класса A.

Таким образом, если смешанная застройка представлена в виде диаграммы распределения различных классов уязвимости

зданий, показатель уязвимости вычисляется в зависимости от представительства разных классов как соответствующее среднее значение для данной выборки зданий.

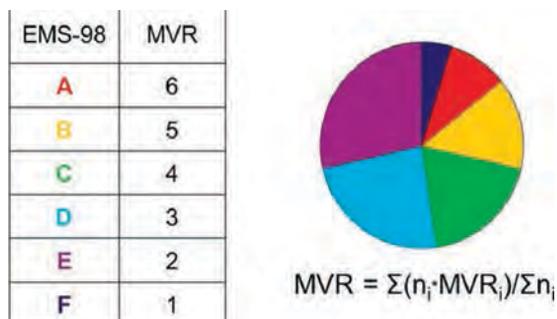


Рис.3.8. Вычисление среднего показателя уязвимости

Минимальное значение параметра $MVR = 1$ может иметь место в случае, если все здания рассматриваемой выборки относятся к классу F , тогда как максимально возможное значение $MVR = 6$ соответствует случаю, если все здания относятся к классу A . В большинстве случаев значения этого параметра принимают промежуточные значения, что соответствует реальным характеристикам существующей застройки в городах и населенных пунктах.

Следует отметить, что для городских территорий показатель MVR , как правило, имеет более низкие значения, чем для сельских населенных пунктов, что отражает особенности городской застройки более современными и менее уязвимыми типами зданий, нежели в сельской местности.

Параметр MVR (средний показатель уязвимости) может оказаться полезным для количественного сравнения уязвимости различных участков застройки. Поэтому для его использования при проведении паспортизации в паспорт каждого здания помимо его конструктивного типа целесообразно добавить также его оценку в классах сейсмической уязвимости EMS-98.

Как будет показано ниже, такое индексирование различных участков застроенной территории по показателю MVR позволяет проводить сравнение их относительной уязвимости, а также дает возможность пространственного картирования сейсмической уязвимости застройки для целей управления риском.

Вопросы для самоконтроля по третьей главе

1. Что такое сейсмическая уязвимость?
2. От чего зависит повреждаемость зданий и сооружений при землетрясениях?
3. Что такое структурные и неструктурные повреждения?
4. Что такое классификация сейсмической уязвимости EMS-98?
5. Какие факторы влияют на сейсмическую уязвимость?
6. Что такое матрицы вероятности повреждения?
7. Что такое графики вероятности повреждения?
8. Что такое функции сейсмической уязвимости?
9. Какие типы зданий по конструктивному решению представлены в Национальных строительных нормах Туркменистана (СНТ 2.01.08-2020)?
10. Что такое прямая и обратная задача сейсмостойкости?
11. Какие методы сейсмической оценки существующих зданий вы знаете?
12. Что такое паспортизация застройки и какую информацию должен содержать паспорт здания?
13. Что такое операционный модальный анализ?
14. Какие приближенные методы сейсмической оценки зданий вы знаете?
15. Что такое дефицит сейсмостойкости и от чего он зависит?

IV ГЛАВА СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК

4.1. Риски в человеческой жизнедеятельности.

Риск (в разных своих проявлениях) присутствует во всех областях человеческой жизнедеятельности. Соответственно, изучение проблем, связанных с возникновением риска, его анализом, количественной оценкой, а также управлением риска, давно уже стало частью фундаментальной науки, на результатах которой базируются многочисленные прикладные исследования. Это относится не только к области природных или техногенных катастроф, но и к другим сферам жизнедеятельности современного общества (см., например, Kolluru et al., 1996, Елохин, 2002, Вишняков, Радаев, 2008, Левашов, 2013, Акимов, 2016, Юе, 2019, Махутов и др., 2019).

В научно-технической литературе, посвященной проблемам принятия решений в условиях недетерминированных параметров и оценке связанного с этим возможного ущерба, встречаются весьма различные определения термина «риск». Общим во всех этих толкованиях является то, что риск подразумевает неопределенность в возникновении неблагоприятного состояния. Кроме этого признается, что величина риска может служить количественной мерой вероятных потерь.

Отметим, что в литературе (в том числе посвященной проблемам сейсмической опасности и сейсмического риска) все-таки иногда имеет место путаница с использованием терминов «опасность» и «риск» (особенно в тех случаях, когда оценка опасности производится с помощью вероятностных методов). Но эти понятия различны и не должны смешиваться – опасность описывает вероятность разрушающего воздействия на рассматриваемую систему, в то время как риск описывает вероятность возникновения потерь (ущерба) в результате этого воздействия.

Определение риска, связанного с возникновением неблагоприятного события (ущерба), многими авторами (см., например,

Мушик, Мюллер, 1990, ГОСТ Р 51897-2002, UNISDR Терминологический глоссарий, 2009, Уое, 2019) дается в виде произведения вероятности возникновения этого события и его последствия:

$$\text{Риск} = \text{Вероятность возникновения} \times \text{Последствие.} \quad (4.1)$$

При этом надо иметь в виду, что вероятность возникновения ущерба определяется, с одной стороны, опасностью (вероятностью возникновения воздействия), а, с другой стороны, уязвимостью (как условной вероятностью того, что в результате этого воздействия возникнет ущерб).

Вероятность возникновения обычно выражается количественно за какой-то промежуток времени (например, год или срок эксплуатации сооружения), а последствие зависит от рассматриваемой задачи и его количественное определение зависит от природы последствий (социальных, экономических, финансовых), обычно подразумевая возникновение ущерба.

Некоторые авторы, принимая возможное суммарное последствие за единицу и тем самым подразумевая диапазон полных потерь от нуля до единицы, преобразуют выражение (4.1) к виду (4.2), определяя риск как произведение опасности и уязвимости:

$$\text{Риск} = \text{Опасность} \times \text{Уязвимость.} \quad (4.2)$$

Стоит подчеркнуть, что для количественного выражения потерь (ущерба) в расчет обязательно должны быть введены ценностные показатели элементов, подверженных риску (в соответствующих единицах измерения).

Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод, что величина риска зависит не только от уровня опасности, но также от совокупности элементов, подвергающихся опасности, включая их уязвимость по отношению к этому виду опасности, а также их ценность (иногда определяемую термином «подверженность»), которая может быть утрачена (полностью или частично) в результате опасного воздействия.

Иначе говоря, риск возникает там, где имеет место суперпозиция ценностей, уязвимости и опасности (Рис. 4.1) и, соответственно, надлежащий подход к оценке и анализу риска должен включать в себя рассмотрение комбинации всех этих факторов.



Рис. 4.1. Схема возникновения риска

Таким образом, здесь и в дальнейшем изложении принято, что величина риска определяется комбинацией этих основных факторов и может быть описана следующим общим выражением:

$$R = H \times V \times A, \quad (4.3)$$

где:

R (Risk) – риск;

H (Hazard) – опасность;

V (Vulnerability) – уязвимость по отношению к данному виду опасности;

A (Assets, Exposure) – ценности, подверженные риску (другими словами, подверженность).

Выражение (4.3) наглядно показывает прямую зависимость уровня риска от каждого из перечисленных факторов. Так, оче-

видно, чем выше уровень сейсмической опасности на рассматриваемой территории (включая как прямые воздействия, так и сопутствующие явления), чем выше уровень уязвимости (зданий и сооружений, объектов инфраструктуры, линий жизнеобеспечения и др.), чем выше плотность застройки и концентрация ценностей (включая население, имущество и другие виды материальных и нематериальных ценностей), тем, соответственно, выше уровень риска (вероятность потерь).

Сравнивая выражение (4.3) с выражением (4.1), можно еще раз отметить, что вероятность возникновения неблагоприятного события (потерь) определяется компонентами опасности (H) и уязвимости (V), а величина последствия зависит от ценности элементов подверженных риску (A).

В научно-методической литературе различными авторами представлены различные классификации рисков, с которыми человеку приходится сталкиваться в своей жизнедеятельности (например, Kolluru и др., 1996, Вишняков, Радаев, 2006, Норкин, 2010, Марченко, 2019). Один из примеров такой классификации показан на рис.4.2.

Рассматривая представленную классификацию применительно к задачам оценки сейсмического риска, понятно, что сейсмический риск, обусловленный тектоническими землетрясениями, относится к природным источникам и, что, в зависимости от силы землетрясения и степени готовности общества к сейсмической угрозе, величина ущерба может быть как незначительной, так и катастрофической.

При решении задач анализа и управления риском необходимо иметь в виду не только источники опасности, но и рассматриваемые объекты риска, которым может быть нанесен ущерб. Применительно к сейсмическому риску необходимо отметить, что сильные землетрясения могут оказывать негативное воздействие и на объекты застройки (экономический риск), и на население (социальный риск), и на окружающую среду (экологический риск).

Важно отметить, что при рассмотрении в качестве объекта риска людей (население), принято дифференцировать индивидуальный риск и коллективный риск. Индивидуальный риск рассматривает неблагоприятное воздействие на жизнь и здоровье индивидуума и представляет собой частоту поражения отдельного человека под воздействием на него факторов риска. В то же время коллективный риск можно трактовать как суммарно ожидаемое число людей пострадавших за определённый временной промежуток в случае возникновения аварийной ситуации или природной катастрофы.

Кроме этого, рассматривая классификацию рисков (*Рис. 4.2*), необходимо отметить, что уровень риска может быть приемлемым или неприемлемым (допустимым или не допустимым). Эта характеристика имеет первостепенное значение для использования в качестве критерия в задачах по управлению риском и принятию инженерно-технических решений.

При анализе риска и принятии технических решений, с одной стороны, как правило, признается практическая невозможность обеспечения полностью свободных от риска решений даже при самых больших затратах, направленных на избежание ожидаемых потерь. С другой стороны, величина ущерба в результате принятого с учетом риска технического решения может оказаться несравнимо малой по сравнению с теми затратами, которые необходимы для его устранения.

Во всяком случае, при принятии решений величина риска, который должен учитываться наиболее полным образом при тщательном анализе всех аспектов его возникновения и направленности, может регулироваться и в определенных случаях должна ограничиваться условием непревышения уровня, соответствующего уровню достаточной надежности. Таким образом, для решения технико-экономических задач, связанных с оценкой возможного ущерба и принятия оптимальных решений, очевидна необходимость количественных оценок.

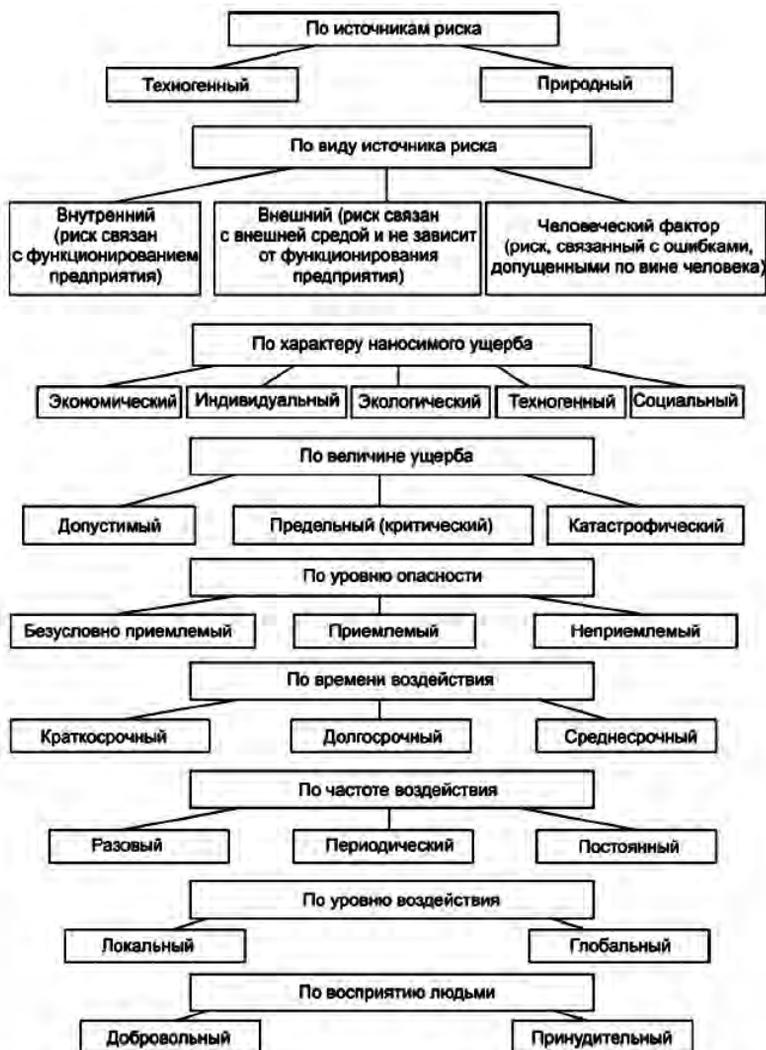


Рис. 4.2. Классификация рисков (Марченко, 2019)

4.2. Количественная оценка сейсмического риска

Методология оценки сейсмического риска, включая анализ опасности, уязвимости и подверженных риску ценностей, зависит от географического масштаба решаемых задач.

Для отдельных (точечных) объектов применяются более детальные методы (включая детальное инженерно-сейсмологическое исследование площадки, обследование фактического состояния зданий и их конструкций, подробную инвентаризацию ценностей для каждого из зданий).

Для уровня городских территорий такая детализация в расчетах риска практически нецелесообразна, однако оценка опасности должна учитывать влияние местных грунтовых условий (микрорайонирование). Оценка сейсмической уязвимости должна основываться на результатах паспортизации застройки с учетом пространственного распределения ценностей в пределах исследуемой территории по отдельным объектам или по расчетным единицам (пространственным ячейкам), таким как например, городские кварталы или районы.

Что касается исследований сейсмического риска в региональном или национальном масштабе, то в этом случае практикуются более обобщенные и укрупненные модели и методы анализа с использованием карт общего сейсмического районирования. При этом в качестве расчетных пространственных единиц могут рассматриваться территории целых населенных пунктов (а иногда и более крупные территории).

Говоря о существующих подходах к оценке сейсмического риска, можно провести аналогию с методами количественной оценки сейсмической опасности. Хотя изначально термин «риск» подразумевает неопределенность (недетерминированность) будущих событий и их последствий, в современной практике используются как вероятностные, так и детерминистические подходы к его оценке.

Одно из основных отличий между этими двумя подходами заключается в методике задания сейсмических воздействий, которое, как понятно из наименования, определяется с использованием либо детерминистических, либо вероятностных методов расчета. При этом, однако, надо иметь в виду достаточную условность использования термина «детерминистический», поскольку значительная доля неопределенности (относящейся как к самим

изучаемым явлениям, так и к расчетным методам и моделям) присутствует в каждом из этих подходов.

При детерминистическом подходе к оценке риска (потенциального ущерба) уровень и распределение сейсмических воздействий определяются в соответствии с так называемым сценарным землетрясением. На практике могут применяться различные способы задания сценарных воздействий. Например, в качестве воздействия может быть использовано макросейсмическое поле, определяемое изосейстами реального или модельного землетрясения, или, что применяется наиболее широко, сценарное землетрясение может определяться заданием конкретных параметров очага землетрясения (магнитуда, глубина, местоположение, и т.д.). В последнем случае могут быть использованы параметры реальных прошлых событий или на основе прогнозных оценок для исследуемой территории могут моделироваться параметры гипотетических землетрясений.

В рамках детерминистического подхода могут рассматриваться одно или несколько сценарных землетрясений. Для сравнения, как правило, выбираются сценарные землетрясения различной силы, а, следовательно, различной повторяемости. Детерминистический подход дает, в первую очередь, качественную (описательную) картину воздействия землетрясения на общество или регион и он часто применяется службами гражданской защиты для оценки и обеспечения готовности к стихийным бедствиям.

Для получения количественных оценок риска (необходимых в первую очередь для целей управления риском, в том числе планирования землепользования и градостроительства, а также проектирования и строительства зданий и сооружений) применяется вероятностный подход, который позволяет количественно оценить и сравнить возможные варианты проведения антисейсмических мероприятий и, соответственно, выбрать оптимальное техническое или управленческое решение, принимая во внимание как уровень возможных потерь, так и вероятность их возникновения (или, другими словами, период повторяемости).

Как уже отмечалось во второй главе книги, в рамках вероятностного подхода рассматривается вся совокупность потенциальных источников сейсмической опасности, каждый из которых может внести свой вклад в разрушающий эффект землетрясений, причем принимается во внимание вероятностная природа самих землетрясений, а также их последствий. Результаты вероятностных расчетов, как будет показано ниже, выражаются в виде кривых сейсмического риска.

В своем исследовании McGuire (2001) подробно обсуждает и сравнивает детерминистический и вероятностный подходы, а также рассматривает круг задач, для которых применение каждого из них наиболее целесообразно. В публикации отмечается, что каждый из двух обсуждаемых подходов имеет свои преимущества и недостатки. Главный вывод исследования заключается в том, что эти два подхода не являются взаимоисключающими, а скорее должны дополнять друг друга.

Неопределенности в расчетах риска.

При оценке сейсмического риска приходится иметь дело с различными видами неопределенностей (классифицируемых в современной научной терминологии как алеаторные и эпистемические), которые являются неотъемлемой частью процесса моделирования и расчетов опасности, уязвимости и риска, равно как и процесса принятия решений в задачах управления риском.

Эпистемические неопределенности связаны с исходной недостаточностью наших знаний (например, об особенностях региональной геологии и тектоники, инженерно-геологических условиях территории, конструктивных характеристиках зданий и сооружений, и т.п.) или неполным пониманием изучаемых процессов (например, поведением грунтов или строительных материалов при сейсмических воздействиях), а также с несовершенством применяемых расчетных моделей и методов.

Эти неопределенности могут быть уменьшены в результате проведенных исследований по сейсмическому районированию и микрорайонированию территорий, детальной паспортизации существующей застройки, оценке фактического состояния и кон-

структивных особенностей зданий и сооружений и других исследований, направленных на пополнение и уточнение информации, необходимой для выполнения расчетов риска. Хотя, в идеале, влияние эпистемических неопределенностей на конечные результаты может быть уменьшено (или даже исключено), однако на практике это, как правило, представляется нецелесообразным вследствие временных, финансовых, технических ограничений.

Алеаторные неопределенности отражают стохастическую природу изучаемых процессов и явлений (сюда относится, например, непредсказуемость точного местоположения очага землетрясения, развития волнового процесса в глубине и на поверхности Земли, колебательного взаимодействия грунтовых оснований и сооружений, прогрессирующего разрушения строительных конструкций, и т.п.).

Если влияние эпистемических неопределенностей поддается уменьшению, то присутствие алеаторных неопределенностей в расчетах сейсмического риска не может быть исключено в силу их случайной природы. Именно поэтому для оценки риска приходится использовать вероятностные методы.

Методика учета и анализа существующих неопределенностей в расчетах сейсмической опасности и сейсмического риска приводится в работах (например, Baker and Cornell, 2008, Aven and Zio, 2011, Tyagunov et al., 2014, Silva, 2019, Foulser-Piggott et al., 2020). Эпистемическая неопределенность может быть учтена введением в расчет так называемого «логического дерева», ветви которого отражают возможный разброс различных модельных параметров (см. например, Grünthal and Wahlström, 2001, Bommer and Scherbaum, 2008, Musson, 2012). Для учета алеаторной неопределенности вводятся функции распределения вероятностей случайных величин (см. например, Соколов, 2012, Чернов, 2017).

Понимание неизбежного присутствия и влияния существующих неопределенностей и оценка их вклада в результаты расчетов сейсмического риска является необходимым условием адекватной оценки, интерпретации и правильного использования полученных результатов.

Исследования, проводимые при оценке сейсмического риска территорий, должны быть направлены на уменьшение эпистемической доли неопределенности за счет разработки моделей, основанных на использовании как можно более полной и достоверной информации, а также совершенствования методов расчета.

Это относится к каждому из компонентов риска, включая опасность (совершенствование методов количественной оценки сейсмической опасности и уточнение карт сейсмического районирования различного масштаба); подверженность (сбор информации и создание базы данных об объектах подверженных риску и их характеристиках, с обязательной пространственной привязкой, а также распределение населения), уязвимость (в том числе всеохватывающая паспортизация всех зданий и сооружений, включая ответственные объекты инфраструктуры и уточнение оценок их сейсмической уязвимости).

Количественная оценка ущерба при землетрясениях.

Величина возможного ущерба при землетрясениях определяется уровнем сейсмических воздействий, способностью сооружений воспринять эти воздействия (то есть их сейсмостойкостью или, наоборот, сейсмической уязвимостью), а также характеристиками последствий, возникающих в результате повреждения.

На величину каждого из компонентов сопутствующего ущерба оказывает влияние совокупность множества случайных факторов, отражающих как стохастическую природу сейсмических воздействий, так и неопределенность реакции зданий и сооружений. Поэтому в общем случае зависимость величины ущерба от степени повреждения сооружения должна быть представлена в вероятностном виде.

Общее выражение для определения риска возникновения ущерба для некоторого объекта, подверженного сейсмической опасности и обладающего сейсмической уязвимостью, может быть записано следующим образом (см., например, Whitman & Cornell, 1976):

$$P[d_i] = \sum_j P[d_i | S_j] \times P[S_j] \quad (4.4)$$

Здесь $P[d_i]$ – вероятность того, что в рассматриваемом объекте возникнет i -я степень повреждения.

$P[d_i|S_j]$ – условная вероятность того, что i -я степень повреждения возникнет при сейсмическом воздействии, соответствующем уровню S_j .

$P[S_j]$ – вероятность возникновения сейсмического воздействия уровня S_j .

В математическом смысле данное выражение представляет собой формулу полной вероятности, с помощью которой можно описать весь спектр возможных состояний системы, поврежденной в результате сейсмических воздействий различного уровня. То есть эта формула позволяет обобщить все возможные комбинации сейсмического воздействия (например, интенсивности) и реакции конструктивной системы (степени повреждения). Напомним, что в макросейсмической шкале MSK-64 уровень сейсмической интенсивности измеряется от 1 до 12 баллов и рассматривается диапазон степеней повреждения от 0 (отсутствие повреждений) до 5 (полное разрушение).

Необходимые для расчетов условные вероятности повреждения для разных типов зданий (значения $P[d_i|S_j]$) содержатся в матрицах повреждаемости (см. Табл. 3.4) или соответствующих графиках вероятности повреждения (см. Рис. 3.1), являющихся характеристиками сейсмической уязвимости для разных типов зданий.

Что касается вероятности возникновения сейсмических воздействий различного уровня (значения $P[S_j]$), они описываются кривыми сейсмической опасности, получаемым по результатам вероятностного анализа сейсмической опасности (см. Рис. 2.10).

Таким образом, комбинируя полученные оценки сейсмических воздействий для площадки расположения рассматриваемого объекта и характеристики его сейсмической уязвимости, определяются вероятности возникновения различных степеней повреждения. После определения вероятности возникновения каждого из возможных состояний повреждения можно оценить величину потерь по каждому из компонентов ожидаемого общего ущерба.

Общая закономерность зависимости величины ущерба от степени повреждения очевидна – с ростом степени повреждения увеличивается величина потерь. Однако в этой общей тенденции для каждого из компонентов ущерба существуют свои особенности. В частности, ущерб от возникновения структурных и неструктурных повреждений самого сооружения напрямую зависит от степени его повреждения, а его величина будет отличной от нуля уже при первой степени повреждения (иначе, по определению, эта степень повреждения была бы нулевой).

Качественная картина закономерностей возникновения других компонентов ущерба может быть представлена следующим образом. Учитывая, что возникновение существенных структурных повреждений в сооружениях соответствует третьей степени повреждения и выше, вероятность возникновения компонентов, связанных с косвенным ущербом при низших степенях повреждения, будет, как правило, нулевой или близка к ней. Тогда как при более высоких степенях повреждения условная вероятность возникновения этих компонентов ущерба будет резко возрастать, приближаясь к предельным значениям при пятой степени повреждения (полном разрушении).

Таким образом, для определения риска каждой из степеней повреждения должно быть поставлено в соответствие определенное количественное последствие по каждому из сопутствующих (экономических и неэкономических) компонентов ущерба.

В практических приложениях для этих целей используются так называемые функции потерь (или функции последствий), представляемые в виде либо вероятностных, либо детерминированных соотношений.

В литературе встречаются различные модели, используемые для оценки вероятных социально-экономических потерь при землетрясениях (см., например, Whitman and Cornell, 1976; Hwang et al., 1994; Miyakoshi et al., 1997; Kircher et al., 1997; Chen and Sun, 2008, Методика, 2002,). В частности, в работах (Tyagunov et al., 2006, 2012) предложены модели для оценки прямых экономических (материальных) и социальных потерь, соответствующие различным степеням повреждения зданий (от $d = 0$ до $d = 5$). Эти

оценки, выраженные в процентах от первоначальной стоимости рассматриваемого здания и изначальной численности людей, находившихся в этом здании в момент сейсмического воздействия, представлены в нижеследующей таблице (Табл. 4.1) и проиллюстрированы на рис. 4.3.

Таблица 4.1: Оценки прямых потерь (последствий), связанных с повреждением зданий при землетрясениях

Степень повреждения здания	$d = 0$	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 4$	$d = 5$
Среднее значение ущерба (%)	0	0,5	10	40	80	100
Среднее значение травматизма (%)	0	0	1	2	10	80
Среднее значение смертельных исходов (%)	0	0	0	0,25	1	2

Вероятность человеческих потерь, как правило, возникает только при степени повреждения 3 и выше, в то время как травматизм может наблюдаться и при меньших повреждениях, что, в том числе, может быть связано с поведением людей, напуганных сейсмическими колебаниями.

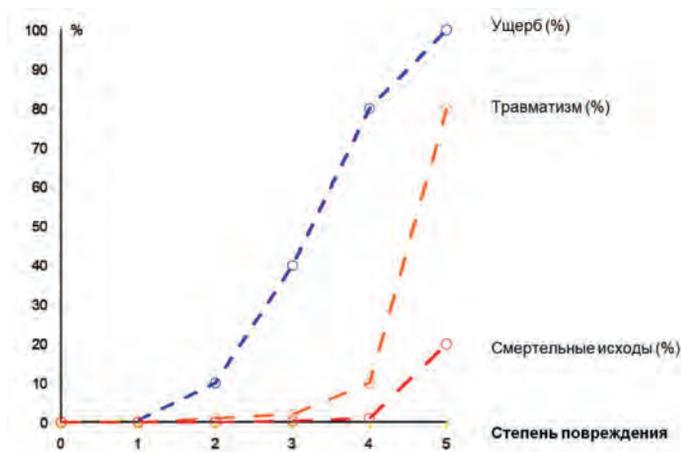


Рис. 4.3. Функции потерь (последствий), применяемые для оценки прямых потерь, связанных с повреждением зданий при землетрясениях

Следует отметить, что при сильных землетрясениях могут возникать и другие виды потерь, такие, например, как потери связанные с повреждением имущества, находящегося в зданиях, или косвенные экономические потери, вызванные (временным или полным) прекращением функционирования поврежденного объекта, возможные экологические и другие последствия, рассмотрение которых, однако, остается за пределами данного курса.

В современной мировой практике основными направлениями территориальной оценки риска являются:

- Оценка возможного ущерба от единичных сейсмических событий (сценарных землетрясений) на основе детерминистического подхода.
- Оценка пространственного распределения риска на основе карт сейсмического районирования (детерминистических или вероятностных для определенных периодов повторяемости).
- Оценка сейсмического риска на основе полного вероятностного подхода (следуя оценкам вероятностного анализа опасности, ВАСО или используя стохастический каталог землетрясений, генерируемый с помощью методов Монте-Карло).

При использовании сценарного подхода результатом оценки риска являются оценки совокупного ущерба от рассмотренного землетрясения, включая пространственное распределение сейсмического эффекта, количество зданий и сооружений, получивших повреждения различной степени, а также возможные экономические и социальные потери. Большим преимуществом сценарного подхода является то, что с его помощью можно оценить величину единовременного ущерба от отдельного землетрясения различной силы, а также проверить готовность системы реагирования в чрезвычайных ситуациях.

Результаты, полученные с помощью карт сейсмического районирования, позволяют проводить сравнительный анализ пространственного распределения уровня сейсмического риска на различных участках исследуемой территории и идентифицировать зоны повышенного риска. Индексация уровня существующего риска на полученных картах может быть выполнена либо в терминах повреждаемости зданий, либо в показателях потенциальных экономических или социальных потерь, причем каж-

дый из перечисленных индикаторов может служить в качестве критерия на стадии управления риском.

При использовании вероятностного подхода результатом расчетов являются кривые сейсмического риска, показывающие вероятность превышения (или непревышения) потерь за определенный интервал времени. Полученные расчетные кривые представляют особый интерес для задач управления риском, в том числе страхования рисков. При этом в качестве количественных показателей сейсмического риска, основанных на результатах вероятностного анализа, часто используются: среднегодовые потери (Annual Average Loss, AAL), удельные среднегодовые потери (Annual Average Loss Ratio, AALR) и максимально возможные потери (Probable Maximum Loss, PML).

Среднегодовые потери (AAL) представляют собой ожидаемое значение потерь в среднем за год в течение длительного периода времени. Следует понимать, что этот показатель не характеризует уровень потерь за один выбранный год, а должен рассматриваться только в долгосрочной перспективе.

Для целей сравнения часто используют также среднегодовые потери в удельном выражении (AALR), нормированные по отношению к общей стоимости ценностей, подверженных риску потерь. Другими словами AALR представляет собой долю восстановительной стоимости, которая, как ожидается, будет утрачена в результате повреждений при землетрясениях. Будучи нормированным показателем риска, величина AALR позволяет сравнивать относительный риск в различных частях исследуемой территории.

Максимально возможные потери (PML) – это оценка максимального значения потерь, которые можно ожидать в течение определенного времени. Этот показатель обычно соотносится с низкой вероятностью возникновения и, в зависимости от решаемых задач, определяется для некоторого набора репрезентативных периодов повторяемости.

Вышеперечисленные показатели риска могут быть представлены как в табличном, так и в графическом виде. Графическое представление показателей риска дается на рис. 4.4, в том числе на рис.4.4 (а) показан пример кривой превышения среднегодо-

вых потерь (AAL), а на рис.4.4 (б) – пример кривой максимально возможных потерь (PML).

Отметим также, что полученные расчетные кривые позволяют выполнять пространственное картирование сейсмического риска для различных (репрезентативных) периодов повторяемости.

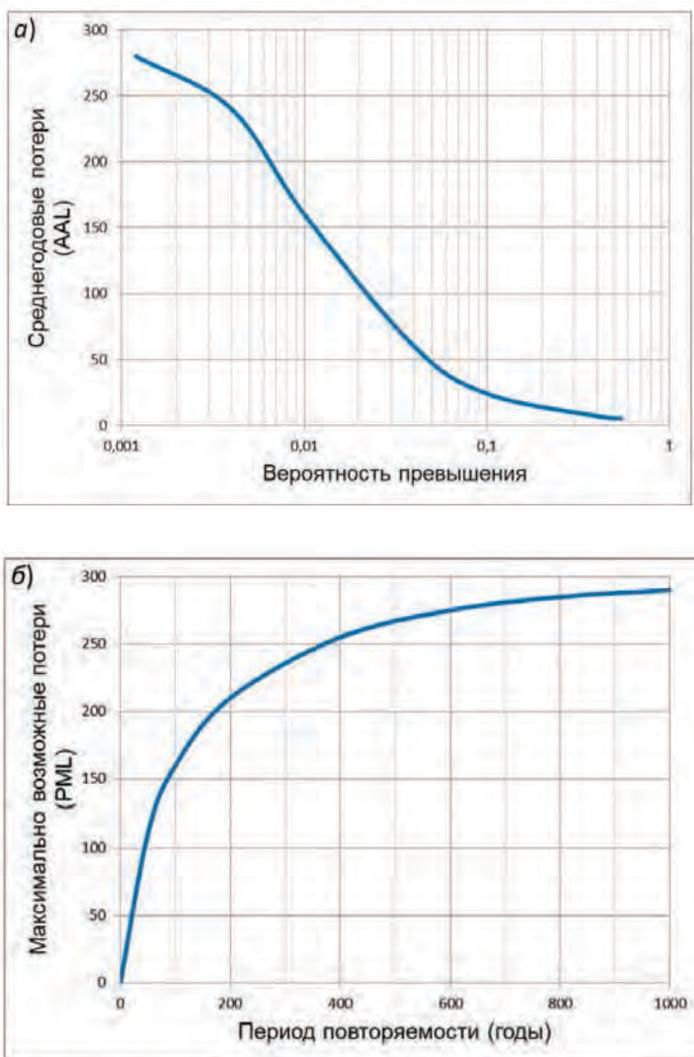


Рис. 4.4. Примеры кривых вероятности превышения среднегодовых потерь (а) и максимально возможного ущерба (б)

4.3. Существующие подходы к оценке сейсмического риска

Ниже рассмотрены некоторые из известных подходов к территориальной оценке сейсмического риска.

Методология HAZUS.

Одним из первых и наиболее широко известных инструментов, предназначенных для территориальной оценки вероятных потерь при землетрясениях, явилась программа HAZUS (HAZard United States), разработанная учеными США в 1990-е годы. В последующие годы программа HAZUS «Землетрясение» была расширена и дополнена другими модулями. В настоящее время используется многомодульный программный комплекс HAZUS®MH (Multi-hazard Loss Estimation Methodology), который позволяет рассматривать не только землетрясения, но и другие природные опасности, в частности, ураганы, наводнения, цунами (fema.gov).

Методология HAZUS предназначена, в первую очередь, для использования сценарного подхода на уровне региона или отдельного города, хотя позволяет оценивать и отдельные объекты. Модуль HAZUS «Землетрясение» рассматривает воздействие землетрясений на различные здания и сооружения, транспортные сети и линии жизнеобеспечения и позволяет оценить широкий спектр вероятных социально-экономических потерь в результате сценарных землетрясений, обеспечивая основу для принятия решений и планирования мероприятий по смягчению последствий стихийных бедствий и для снижения потенциальных будущих потерь.

Изначально большим методологическим преимуществом программного комплекса HAZUS явилось использование геоинформационной системы (ГИС), без чего невозможно представить современный и эффективный подход к территориальной оценке риска. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что использование ГИС предполагает необходимость разработки обширных баз данных, содержащих информацию, как о пространственном распределении объектов застройки, так и распределении населения на рассматриваемой территории.

Программное обеспечение HAZUS основано на использовании соответствующих баз данных для всех штатов США, которые смоделированы на основе осредненных данных и содержат информацию о застройке и населении (по данным переписи). Выполнение расчетов с использованием базы данных, заложенных в программу «по умолчанию», позволяет получать предварительную (грубую) оценку потерь, однако для получения более полных и точных оценок требуется проведение детальных исследований (включая паспортизацию и инвентаризацию застройки, а также инженерно-геологические исследования непосредственно для изучаемой территории), причем уровень сложности и детальности вводимых данных определяется пользователем программного обеспечения.

В качестве параметров паспортизации зданий, используемых в базе данных HAZUS, включены, в частности, наименование и функциональное назначение здания, его адрес и географические координаты, количество людей, находящихся в здании, как в дневное, так и в ночное время, площадь здания, стоимость здания и содержащегося в нем имущества; кроме того для коммерческих и производственных зданий стоимость оборудования, дневная прибыль и ежедневно выплачиваемая зарплата, стоимость ежедневной аренды, а также стоимость возможного переезда. Также указываются данные о типах грунтов, включая их склонность к разжижению и уровень грунтовых вод на рассматриваемой площадке. Если какая-либо информация недоступна, недостающие параметры могут быть указаны приближенно на основе оценочных или осредненных данных.

Кроме вышеуказанной информации, для выполнения расчетов повреждений и потерь, вызванных сценарным землетрясением, для каждого из объектов, внесенных в базу данных программы HAZUS, должно быть установлено соответствие с определенным набором параметров. В частности, необходимыми расчетными параметрами являются: характеристики здания (включая его функциональное назначение, конструктивный тип, а также проектный уровень антисейсмического усиления), функ-

ции повреждаемости, как для несущих, так и для ненесущих конструкций, коэффициенты для расчета человеческих потерь и травматизма, коэффициенты для расчетов затрат на ремонт и восстановление как самого здания, так и находящегося в нем оборудования, а также параметры для расчетов потери функциональности и длительности простоя (количество дней, необходимых для восстановления) в зависимости от степени повреждения.

Последовательность выполнения расчетов в HAZUS начинается с выбора сценарного землетрясения. Программа позволяет пользователю самостоятельно выбрать какое землетрясение он хочет использовать для расчетов, в том числе это может быть либо сейсмическое событие с детерминистически определенными параметрами, либо вероятностная оценка распределения сейсмической опасности, либо карта с заданным распределением интенсивности сотрясений. Дополнительно может быть указана инженерно-геологическая информация, а именно пространственное распределение различных типов грунтов на исследуемой территории. Если эта информация отсутствует, расчеты могут быть выполнены для «средних» грунтов.

HAZUS рассматривает следующие возможные степени (состояния) повреждения зданий, подвергнутых сейсмическим воздействиям: 0 – (none) отсутствие повреждений, 1 – (slight) легкое повреждение, 2 – (moderate) умеренное повреждение, 3 – (extensive) значительное повреждение, 4 – (complete) полное разрушение. Каждое из возможных состояний повреждения определяется в зависимости от соотношения и уровня повреждений как несущих элементов (ответственных за конструктивную целостность здания), так и ненесущих (имеющих функциональное и/или декоративное назначение) элементов здания.

Для оценки повреждаемости разных типов зданий (характерных для застройки США), а также объектов инфраструктуры (включая транспортные сооружения и линии жизнеобеспечения), в программном комплексе HAZUS разработаны функции повреждаемости, которые позволяют оценить вероятность возникновения различного уровня повреждения в зависимости от интенсивности сейсмических воздействий (Рис. 4.5).

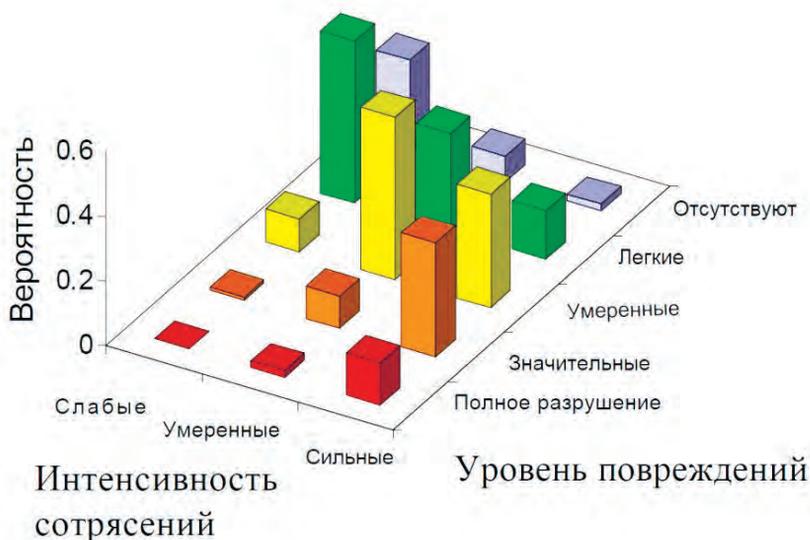


Рис. 4.5. Пример оценки распределения вероятности повреждений для различных уровней интенсивности сотрясений

Помимо функций повреждаемости, определяющих вероятность конструктивных повреждений зданий и сооружений, важным компонентом программного обеспечения HAZUS «Землетрясение» являются функции потерь, которые позволяют оценить уровень вероятных потерь в зависимости от уровня повреждений. Для этих целей программный комплекс использует осредненные оценки стоимости ремонта и восстановления для различных классов (жилых, коммерческих, промышленных) и конструктивных типов зданий. Кроме этого в программе используются оценки функциональной уязвимости (для различных транспортных сооружений и линий жизнеобеспечения), позволяющие оценить время выхода из строя поврежденных объектов до их восстановления.

Задавая сейсмические воздействия и используя либо данные, содержащиеся в программном комплексе по умолчанию, либо уточненные данные в соответствии с особенностями исследуемой территории, пользователь получает результаты расчета.

Первоначально, по информации разработчиков (Kircher et al, 2006), программный комплекс HAZUS «Землетрясение» предназначался для использования в качестве инструмента планирования и подготовки к будущим землетрясениям. В дальнейшем программа была усовершенствована и в современном виде она может использоваться также для оперативной оценки последствий землетрясений. Для этого пользователю предлагается использовать оперативные данные и карты сейсмических сотрясений, генерируемые и публикуемые геологической службой США (USGS) в режиме реального времени непосредственно после проявления сейсмических событий. Эти оценки ущерба и потерь могут использоваться агентствами по чрезвычайным ситуациям для принятия мер по ликвидации последствий и восстановлению после землетрясения.

В методологическом плане программа HAZUS оказала большое влияние на развитие методов оценки сейсмического риска во всем мире. Однако ее существенным недостатком является привязка к региональным условиям (включая характеристики опасности, типологию зданий и оценки их уязвимости) и недостаточная гибкость, ограничивающая возможность ее применения в других регионах планеты.

Методология CEDIM.

В Германии сотрудниками Центра управления катастрофами и уменьшения риска CEDIM (Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology) была разработана методика для оценки и картирования сейсмического риска на национальном уровне (Tyagunov et al., 2006). В дальнейшем она была дополнена и переработана для уровня городских территорий, а также была адаптирована для применения в других регионах, в частности, в странах Центральной Азии (Tyagunov et al., 2012).

Разработанный алгоритм анализа сейсмического риска также использует возможности ГИС, послойно комбинируя данные о пространственном распределении сейсмической опасно-

сти, уязвимости застройки, а также ценностей, подверженных риску повреждения и потерь. Основное внимание уделяется зданиям существующей жилой застройки, при этом проводится анализ прямого ущерба, связанного с повреждением зданий, а также (опционально) возможных человеческих потерь. Анализ сейсмической уязвимости зданий проводится с использованием классификации Европейской Макросейсмической Шкалы (EMS-98).

Для оценки величины потенциального ущерба в денежном выражении используются стоимостные показатели строительства и восстановления жилых зданий. Что касается сейсмических воздействий, они могут задаваться, во-первых, в виде карты сейсмической опасности, а во-вторых, в виде заданных параметров сценарных землетрясений. Данный подход также применим для оперативной оценки ущерба в режиме реального времени в случае землетрясения.

В рамках этого подхода, который изначально разрабатывался для крупномасштабных исследований, вся исследуемая территория разбивается на расчетные ячейки, каждая из которых является объектом анализа. При рассмотрении проблемы в масштабах страны размер ячеек расчетной сетки определялся территорией отдельных коммун (или зон почтовых индексов). При оценке риска для территории города, размер расчетных ячеек может быть значительно уменьшен (до территории отдельных районов, кварталов или меньших участков застройки). Разбивка территории на ячейки может быть достаточно произвольной и применение более мелкой расчетной сетки позволит повысить точность результатов, что, соответственно, потребует соответствующей детализации исходной информации, необходимой для расчетов риска, в том числе по сейсмической уязвимости зданий, стоимости их строительства и количеству проживающих в них людей.

Для каждой ячейки расчетной сетки, в зависимости от состава существующей застройки, выполняется композиционное моделирование уязвимости застройки, которое определяется процентным содержанием зданий, соответствующих различным классам уязвимости EMS-98.

Для качественного описания состояния зданий, подвергнутых сейсмическим воздействиям, в зависимости от уровня повреждения несущих и ненесущих элементов, EMS-98 использует шесть степеней повреждения – от незначительных (1 степень) до полного разрушения (5 степень), включая также «нулевую» степень, то есть отсутствие повреждений. В расчетах повреждаемости зданий при сейсмических воздействиях используются матрицы вероятности повреждения, построенные для всех классов уязвимости EMS-98.

Комбинируя матрицы повреждения для классов EMS-98 и композиционные модели уязвимости, для всех расчетных ячеек формируются соответствующие матрицы повреждаемости, что позволяет оценить распределение степеней повреждения зданий при различной интенсивности воздействий в каждой ячейке.

С одной стороны, оценки повреждаемости застройки могут быть представлены в терминах степеней повреждения (в соответствии с классификацией EMS-98). С другой стороны, оценка ущерба может быть представлена в виде удельного ущерба, величина которого определяется отношением стоимости ремонта поврежденного здания к стоимости его полного восстановления.

Далее, вводя в расчет абсолютные значения ценностей, подверженных риску потерь (стоимостные показатели строительства и количество людей), и используя функции потерь, соответственно, можно определить абсолютную величину ущерба, причиненного сценарным землетрясением, или потенциального ущерба (риска) для существующего уровня опасности на рассматриваемой территории.

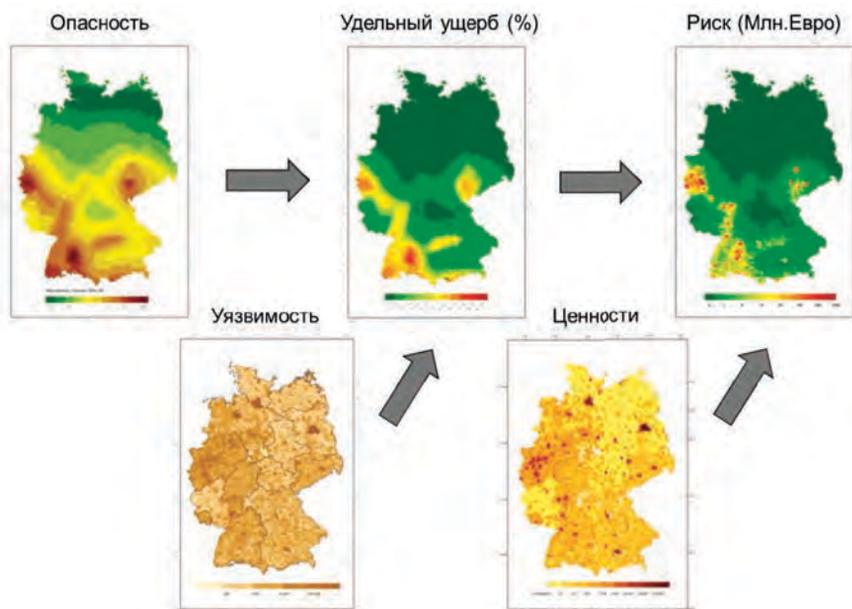


Рис. 4.6. Схема анализа и картирования сейсмического риска

В зависимости от того, используется ли в качестве исходных данных вероятностная карта сейсмической опасности или детерминированное поле сейсмических воздействий от единичного землетрясения, полученные результаты могут быть представлены либо в виде пространственного распределения сейсмического риска, либо в виде ущерба от заданного сценарного события.

Схема анализа и районирования риска на основе вероятностной карты сейсмической опасности в национальном масштабе страны показана на рис. 4.6.

Последовательно комбинируя оценки сейсмической опасности и построенные модели уязвимости застройки, для каждой расчетной ячейки на базе созданной ГИС вычисляется величина среднего удельного ущерба (в процентах от общей стоимости зданий). Далее, вводя в расчет количественные оценки стоимости строительства, вычисляется совокупная величина ожидае-

мых потерь в денежном выражении (значения параметров риска на картах показаны цветом: от наименьшего уровня, показанного зеленым цветом, до высокого, выделенного темно-красным).

Сравнительный анализ карт сейсмической опасности, удельного ущерба и сейсмического риска, представленных на рис.4.6, наглядно иллюстрирует вклад каждого из компонентов (уровня опасности, конструктивной уязвимости и концентрации ценностей) в совокупный уровень риска.

Оценка риска на основе карты сейсмического районирования дает возможность провести сравнительный анализ распределения риска на исследуемой территории, позволяет выявить участки территории, отличающиеся наиболее высоким уровнем риска, тогда как сценарный подход позволяет оценить ущерб в случае возникновения отдельных землетрясений и, кроме того, может служить для оперативной оценки произошедших событий в режиме реального времени.

Методология ЭКСТРЕМУМ.

В системе МЧС России широко применяется специализированная геоинформационная система «Экстремум» – программный комплекс, включающий картографические и атрибутивные базы данных, модели для прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их последствий, сценарии реагирования при землетрясениях, а также других природных и техногенных катастрофах.

В основу расчетного алгоритма системы «Экстремум», созданной в конце 1990-х годов, заложены научно-методические материалы ВНИИ ГОЧС МЧС РФ, СЦ ИГЭ РАН и ООО ЦИЭКС и, в частности, «Методика оценки последствий землетрясений» (1994), «Методика прогнозирования последствий землетрясений» (2000), «Методика комплексной оценки индивидуального риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (2002).

Ниже кратко представлены основные положения данной методики, включая расчетные формулы и параметры.

Отметим, что подробное описание расчетной методики, в том числе ее усовершенствование и результаты практического применения на различном уровне (локальном, региональном, федеральном) представлены в публикациях (Александров и др., 2015, Ларионов и др., 2017, Осипов и др., 2015, Фролова и др., 2005, Шахраманьян и др., 2000, 2004, Frolova et al., 2012, 2017, 2020).

Разработанная методика применяет вероятностный подход для определения потерь людей и объемов разрушений на территориях, подвергшихся сейсмическому воздействию. Принимается, что объем разрушений и людские потери, в основном, определяются двумя факторами – интенсивностью землетрясения (моделью воздействия) и сопротивлением этому воздействию, которое описывается законами разрушения (для зданий и сооружений) и законами поражения (для людей). Все другие факторы, влияющие в той или иной степени на последствия землетрясений, учитываются через эти факторы.

В качестве характеристики сейсмического воздействия (уровня опасности) используется макросейсмическая интенсивность (балльность), которая может либо вычисляться в зависимости от магнитуды произошедшего землетрясения и эпицентрального расстояния, либо определяться по картам сейсмического районирования (ОСР, ДСР, СМР).

Для определения законов разрушения (повреждаемости) зданий при землетрясениях в методике используется классификация зданий шкалы MMSK-86 (модифицированная версия шкалы MSK-64), в которой все здания разделены на две группы: здания первой группы (без антисейсмических мероприятий) в зависимости от конструктивных особенностей подразделяются на типы А, Б, В и подтипы А1, А2, Б1, Б2, В1, В2; здания второй группы (с антисейсмическими мероприятиями) в зависимости от уровня расчетной сейсмичности подразделяются на типы С7, С8, С9.

Методика рассматривает пять возможных степеней повреждения зданий: 1) легкие повреждения; 2) умеренные повреждения; 3) тяжелые повреждения; 4) частичные повреждения несущих конструкций; 5) обвалы.

Для оценки повреждаемости зданий в методике системы «Экстремум» определены так называемые законы разрушения зданий, которые сформулированы на основе анализа статистических материалов по повреждению и разрушению жилых, общественных и промышленных зданий от воздействия землетрясений различной интенсивности. Параметры законов разрушения представлены в таблице 4.2, где для разных типов зданий показаны значения математического ожидания сейсмической интенсивности (с градацией 0,5 балла), соответствующей возникновению определенных степеней повреждения от $d = 1$ до $d = 5$ (для аппроксимации данных используется нормальный закон распределения при $\sigma = 0,4 - 0,5$).

Таблица 4.2

**Параметры законов разрушения
для зданий различного типа**

Типы зданий по ММСК-86	Степени повреждения зданий				
	d = 1	d = 2	d = 3	d = 4	d = 5
А	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Б	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
В	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
С7	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
С8	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
С9	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

Для оценки вероятных потерь среди населения методика использует так называемые законы поражения людей, под которыми понимается зависимость между вероятностью поражения людей и интенсивностью землетрясения. По сути, законы поражения представляют собой ранее рассмотренные функции потерь (последствий) при землетрясениях.

Для этих целей используются вероятностные оценки поражения людей, полученные на основе статистической обработки материалов последствий прошлых землетрясений, которые представлены в таблице 4.3. Структура вероятных потерь включает в себя санитарные потери, связанные с травматизмом людей, а

также безвозвратные потери, связанные с гибелью людей при землетрясениях.

Таблица 4.3

Вероятность поражения людей при различной степени повреждения зданий

Структура потерь	Вероятность поражения людей при степени повреждения зданий				
	d = 1	d = 2	d = 3	d = 4	d = 5
Общие	0	0,01	0,11	0,6	0,97
Безвозвратные	0	0	0,02	0,23	0,6
Санитарные	0	0,01	0,09	0,37	0,37

Для проведения расчетов исследуемая территория разбивается на элементарные площадки (расчетные ячейки), размеры которых назначаются в зависимости от искомой точности расчета. Координаты площадок (ячеек) принимаются равными значениям координат их центров x, y .

Вероятность поражения населения в пределах рассматриваемой площадки от сотрясений различной интенсивности определяется по формуле (в которой для зданий различного типа необходимо применять соответствующий закон поражения, табл. 4.3):

$$P(x, y) = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P(I) f(x, y, I) dI,$$

где: I_{\min} и I_{\max} – минимально и максимально возможная интенсивность сотрясений в пределах заданной площадки;

$P(I)$ – вероятность поражения людей при повреждении здания землетрясением интенсивностью I ;

$f(x, y, I)$ – плотность вероятности распределения интенсивности I в пределах площадки с координатами x, y .

Количество людей в пределах площадки определяется с учетом плотности населения.

Математическое ожидание потерь $M(N)$ среди населения в целом по всей территории города S с учетом размещения людей в зданиях в течение суток определяется по формуле:

$$M(N) = \iint_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(x, y, I) \cdot P(I) \cdot f(t) \cdot dI \cdot dt \cdot dx \cdot dy.$$

Здесь $\Psi(x, y)$ – плотность населения в пределах рассматриваемой площадки, $f(t)$ – функция, характеризующая размещение людей в зданиях в течение суток.

Математическое ожидание числа зданий с различной степенью повреждения d в целом по городу для определенного типа зданий определяется по формуле:

$$M(V_d) = \iint_{S_r} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_d(I) \cdot f(x, y, I) \cdot \varphi(I) \cdot f(x, y) \cdot dI \cdot dx \cdot dy,$$

где: $\varphi(x, y)$ – количество зданий рассматриваемого типа, приходящихся на единицу площадки с координатами x, y .

Кроме проведения вышеуказанных расчетов, методика позволяет оценивать индивидуальный сейсмический риск, который определяется как вероятность смертельного исхода от землетрясений на рассматриваемой территории за один год (размерность индивидуального риска 1/год).

Для оценки индивидуального сейсмического риска в методике используется формула:

$$R \frac{H}{N} = \iint_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} f(x, y, I) \cdot P(I) \cdot f(t) \cdot \psi(x, y) \cdot dI \cdot dt \cdot dx \cdot dy.$$

где подынтегральное выражение определяет математическое ожидание числа пострадавших на рассматриваемой территории.

H – вероятность возникновения сейсмических событий для данной территории в течение года, принимаемая по картам сейсмического районирования.

N – численность населения на рассматриваемой территории.

ГИС «Экстремум» работает в двух режимах: исследовательском и оперативном, первый из которых предназначен для решения научно-практических задач по прогнозированию и оценке риска на различных уровнях (см, например, Frolova et al, 2016), а также задач управления риском, тогда как оперативный режим служит для отработки и планирования мероприятий быстрого реагирования при чрезвычайных ситуациях.

Методология GEM OpenQuake.

В рамках инициативы GEM (Global Earthquake Model – глобальная модель землетрясений) предпринята попытка глобальной стандартизации существующих подходов к оценке сейсмической опасности и сейсмического риска. Вместе с тем, было выполнено сравнение существующих подходов и программного обеспечения, предназначенных для оценки сейсмической опасности и сейсмического риска.

Результаты выполненного сравнения представлены в технических отчетах (Danciu et al., 2010; Crowley et al., 2010). Кроме того там же были сформулированы ожидаемые характеристики и требования, предъявляемые к программному обеспечению GEM, которое в частности, должно:

- позволять пользователям загружать и использовать их собственные модели опасности, уязвимости и элементов риска (чтобы избежать привязки к какому-либо конкретному региону);
- совмещать расчеты опасностей и рисков в рамках одного программного пакета и, вместе с тем, позволять пользователям выполнять расчеты отдельно для оценки опасности и отдельно для риска;
- быть программным обеспечением с открытым исходным кодом;
- не зависеть от какой-либо определенной платформы;
- иметь удобный и интуитивно понятный пользовательский интерфейс;
- использовать логические деревья для учета эпистемической неопределенности;
- иметь адекватную техническую поддержку и документацию;

– позволять моделирование различные видов ценностей, подверженных риску (включая, в частности, здания, население, инфраструктуру);

– включать моделирование пространственной корреляции невязок в сильных движениях грунта и корреляции неопределенности в уязвимости зданий;

– быть модульным и, таким образом, позволять использовать некоторые компоненты для оценки риска от других опасностей;

– быть масштабируемым с использованием параллельных вычислений;

– производить полный спектр продуктов, в том числе серии стохастических событий, поля сейсмических колебаний грунта, унифицированные спектры опасности, карты и графики сейсмической опасности, диаграммы дезагрегации, карты и графики повреждений и потерь.

Часть указанных требований успешно реализована в программном комплексе GEM OpenQuake (Pagani et al., 2014, Silva et al., 2014). Надо отметить, однако, что разработанный программный продукт вплоть до настоящего времени не обладает удобным пользовательским интерфейсом; программа достаточно сложна в использовании, что требует специальной подготовки и дополнительных навыков от пользователей. Это ограничивает широкое использование программы.

Текущая версия программного обеспечения GEM OpenQuake и сопровождающая документация (версия 3.20.1, август 2024) доступны для скачивания и свободного использования на сайте GEM: <https://www.globalquakemodel.org/openquake>

Программный комплекс OpenQuake, обладая модульной структурой, включает в себя несколько калькуляторов, которые позволяют выполнять расчеты сейсмической опасности и сейсмического риска, используя как детерминистический, так и вероятностный подходы. Отличительной особенностью программы является возможность учета эпистемических неопределенностей (относящихся к различным исходным параметрам, например, магнитуды землетрясений или функции затухания сейсмических колебаний) с использованием многоуровневого логического дерева.

Для моделирования элементов риска пользователю предлагается соотнести элементы исследуемой застройки с предлагаемой таксономией (классификацией) зданий GEM или HAZUS. Кроме того должны быть указаны стоимостные характеристики элементов риска, а также их географические координаты.

Для оценки повреждений зданий при землетрясениях используются функции повреждаемости, которые могут быть заданы пользователем в непрерывной или дискретной форме. Соответственно, для оценки потерь используются функции сейсмической уязвимости.

К настоящему времени, на основе разработанного программного обеспечения и используя осредненные модели и оценки, полученные по результатам международного сотрудничества и выполнения региональных проектов GEM, были построены несколько версий глобальной карты сейсмического риска, которые доступны на сайте GEM: <https://www.globalquakemodel.org/gem>.

Глобальная карта сейсмического риска GEM (Silva et al, 2023) показывает географическое распределение оценок среднегодового ущерба, вызванного сейсмическими колебаниями (последствия вторичных опасностей не учитываются). Оценки риска, полученные с помощью программы OpenQuake, представлены на гексагональной сетке размерами 0,30 x 0,34 десятичных градуса.

Представленные оценки ущерба (в долларах США, USD) нормализованы на среднюю стоимость строительства в соответствующей стране (USD/м²). Оценки охватывают жилые, общественные и промышленные здания и учитывают содержание как структурных, так и неструктурных компонентов. Использование нормализованной метрики позволяет напрямую сравнивать риск между странами с сильно различающимися затратами на строительство. Оценки потерь учитывают только прямой физический ущерб, нанесенный зданиям сейсмическими воздействиями (косвенные потери не учитываются).

Кроме того, следуя методологии GEM, разработаны профили для многих стран, находящихся в зонах высокой сейсмической опасности, в том числе для Туркменистана (Рис. 4.7).

Сейсмический профиль страны включает в себя, в частности, карту сейсмической опасности, карту подверженности и оценки распределения среднегодовых потерь как в абсолютном (AAL), так и в удельном по отношению к полной стоимости (AALR) выражении.

Предполагается, что обновленные версии всех карт GEM будут публиковаться на регулярной основе по мере накопления и уточнения данных, необходимых для расчетов риска.



Рис. 4.7. Сейсмический профиль территории Туркменистана по оценке GEM (Silva et al, 2023)

Кроме вышеописанных методов и программ, применяемых в современной мировой практике для количественной оценки сейсмического риска, можно отметить другие известные подходы, например, CAPRA, SELENA, ELER, QLARM (Erdik et al, 2014).

Обзор множества существующих методов оценки сейсмического риска показывает, что в общем случае вычислительный алгоритм состоит из модуля опасности, модуля подверженности и модуля уязвимости и включает в себя идентичные элементы и этапы расчетов риска, хотя и с разной степенью детальности.

Общая схема элементов, которые традиционно включает в себя вычислительный алгоритм сейсмического риска, показана на рис. 4.8.



Рис. 4.8. Элементы вычислительного алгоритма сейсмического риска

С одной стороны, можно отметить достаточную методологическую универсальность разработанных методов и программ, что дает возможность их практического применения в различных регионах, (как зачастую и происходит в рамках многочисленных международных проектов по оценке сейсмического риска).

С другой стороны, говоря о достоверности получаемых оценок, важно подчеркнуть принципиальное значение использования региональных данных в качестве исходной информации для расчетов.

Это относится как к фактору сейсмической опасности (включая региональные сеймотектонические и сейсмогеологические характеристики, определяющие формирование опасности, особенности затухания сейсмической энергии волн с расстоянием, и др.), так и к факторам подверженности и сейсмической уязвимости (имея в виду существующие различия в типологии зданий и сооружений, особенности применяемых строительных материалов и технологий, методов строительства и градостроительства, и др.).

Резюмируя вышесказанное можно констатировать, что для количественной оценки сейсмического риска широко и успешно применяются как детерминистические, так и вероятностные методы, которые эффективно дополняют друг друга, позволяя всесторонне оценить существующий риск.

На практике рекомендуется выполнять комплексное исследование, включая пространственный анализ риска, его вероятностную оценку, а также рассмотрение сценариев землетрясений. Вместе с тем понятно, что при выборе методики должны учитываться как цели исследования, так и сопутствующие условия, включая административные, технические и финансовые ресурсы, а также доступные временные рамки.

4.4. Оценка сейсмического риска на примере Ашхабада

Ниже рассматриваются некоторые результаты, полученные в рамках проекта по оценке сейсмического риска для территории столицы Туркменистана, в том числе описаны основные положения и шаги методологии, адаптированной к локальным условиям.

Традиционно (Рис. 4.9) схема оценки сейсмического риска включает анализ сейсмической опасности на исследуемой территории и ее суперпозицию с объектами риска (элементами городской застройки). Объекты риска характеризуются, с одной стороны, сейсмической уязвимостью, а с другой стороны, ценностью (включая стоимостные оценки строительных конструкций, а также количество людей, находящихся в различных зданиях в разное время суток).



Рис 4.9. Схема оценки риска для территории Ашхабада

В качестве объектов, подверженных риску (элементов риска), в проекте рассматривалась городская застройка и население города. В связи с ограниченными сроками выполнения работ объекты городской инфраструктуры (такие как, транспортные сети и сооружения, линии жизнеобеспечения и т.п.) не рассматривались.

Основной акцент исследований был сделан на здания жилой застройки, которые занимают большую часть застроенной сре-

ды на территории Ашхабада. Кроме жилых зданий отдельными объектами рассмотрения являлись также здания детских садов и школ.

Оценки сейсмического риска рассматривались в терминах вероятных социально-экономических потерь, подразумевая только прямой ущерб, то есть ущерб, нанесенный рассматриваемым объектам (зданиям) непосредственно в результате сейсмических воздействий. Компоненты косвенного ущерба в проведенном исследовании не рассматривались.

Важным результатом выполненных работ является разработка геоинформационной системы (ГИС) для территории Ашхабада, которая позволяет интегрировать и анализировать имеющуюся информацию о сейсмической опасности и объектах существующей городской застройки, подразумевая как их сейсмическую уязвимость, так и экономическую ценность, а также распределение населения (Тягунов, Николаев, 2022).

Методология территориальной оценки сейсмического риска для Ашхабада включала в себя следующие основные этапы работ:

Оценка сейсмической опасности:

- Вероятностная оценка сейсмической опасности для Ашхабада и определение вероятности превышения (периодов повторяемости) различных уровней сейсмической интенсивности на территории города.
- Разработка карты сейсмического микрорайонирования для территории Ашхабада и ее интеграция в ГИС.
- Выбор нескольких вариантов потенциальных землетрясений, представляющих практический интерес при разработке сценариев с учетом, во-первых, вероятности возникновения, а во-вторых, разрушительной силы на территории города и количественное определение параметров очага.
- Оценка параметров затухания сейсмической энергии и интенсивности сейсмических колебаний с расстоянием и построение теоретических изосейст для выбранных вариантов потенциальных землетрясений.

Для выбранных сценарных землетрясений оценка уровня интенсивности сейсмических сотрясений и распределение сейсмического эффекта по территории города.

Оценка сейсмической уязвимости:

- Выделение репрезентативных типов зданий, характерных для исследуемой территории и их классификация по сейсмической уязвимости.
- Построение графиков повреждаемости и функций уязвимости для каждого из выделенных репрезентативных типов (классов) зданий.
- Паспортизация зданий на исследуемой территории, в том числе их классификация по типам (и классам уязвимости).
- Интеграция базы данных паспортизации в ГИС, для чего все здания, прошедшие паспортизацию и внесенные в базу данных, получили географическую привязку.
- Построение пространственных моделей уязвимости с помощью ГИС для последующего использования в расчетах сейсмического риска.
- Сравнительная оценка сейсмической уязвимости застройки для различных районов на территории города.

Оценка подверженности сейсмическому риску:

- Анализ и пространственное моделирование существующей городской застройки, включая различные типы зданий, а также городское население.
- Определение стоимостных показателей строительства различных типов зданий, характерных для городской застройки.
- Оценка распределения населения в различных зданиях и на территории города в различное время суток.

Оценка сейсмического риска:

- Разработка алгоритма для проведения количественных расчетов вероятных потерь при землетрясениях с помощью ГИС.
- Количественные расчеты уровня сейсмического риска для Ашхабада.

- Разработка карты сравнительного распределения риска на территории города на основе карты сейсмического микрорайонирования.

- Оценки потенциального прямого ущерба при землетрясениях, включая вероятные экономические потери, вызванные повреждением зданий, а также возможные социальные потери.

- Генерирование сценариев землетрясений и оценка социально-экономического ущерба, причиненного этими землетрясениями на территории города.

Следует отметить, что для оценки сейсмического риска рассматривалась не вся территория Ашхабада, очерченная его официальными административными границами, а была выделена часть территории города, которая расположена в следующих границах современной территории Ашхабада (Рис. 4.10):

- Север – ул. Кольцевая (до канала).
- Юг – ул. Чандыбиль.
- Восток – ул. Магистральная.
- Запад – 90 разъезд (Куртли).

Площадь выделенной территории составляет примерно 136 км² и в пределах этой территории сконцентрирована основная часть городской застройки и населения Ашхабада.

Сбор данных и моделирование

Исследования, относящиеся к оценке сейсмической опасности, были выполнены сотрудниками Института сейсмологии и физики атмосферы (ИСФА) Академии наук Туркменистана (Абасеев и др., 2022).

В частности, специалистами ИСФА были получены следующие данные, необходимые для расчетов сейсмического риска:

- Вероятностные кривые сейсмической опасности для территории Ашхабада.

- Карта сейсмического микрорайонирования городской территории, представляющая собой уточненные оценки приращения сейсмического эффекта за счет локальных грунтовых условий.

- Параметры вероятных гипотетических землетрясений, которые могут вызвать разрушительный эффект на территории города.

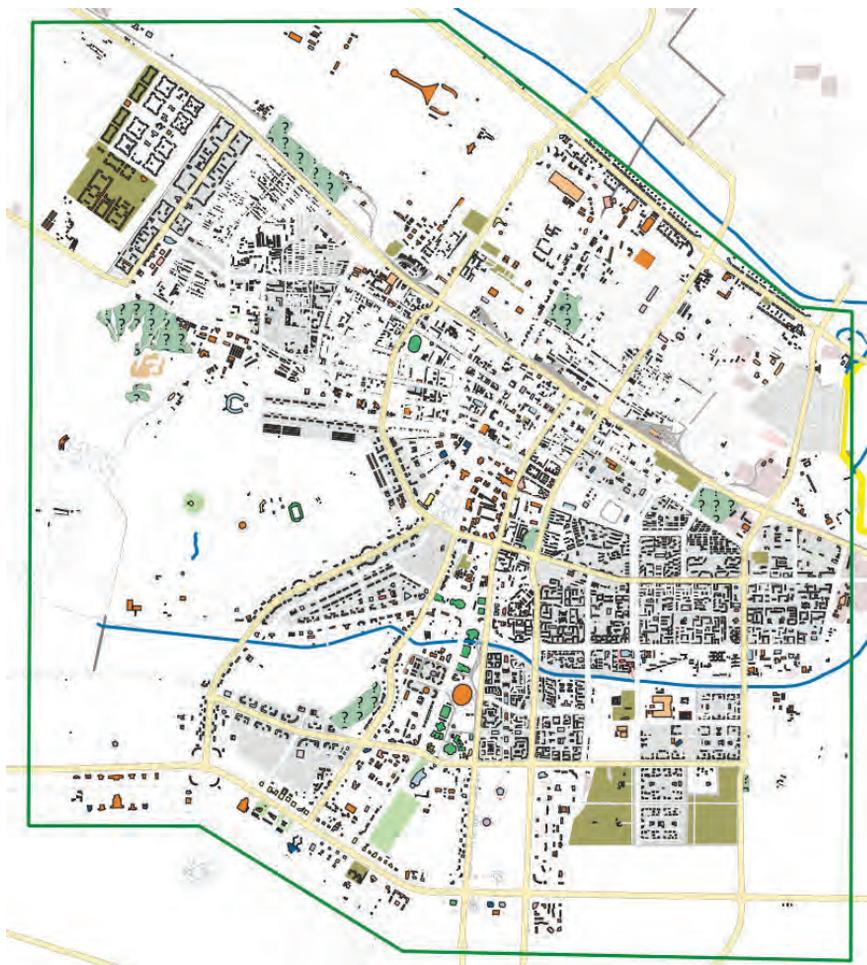


Рис. 4.10. Границы территории, выбранной для исследования по оценке сейсмического риска

На рис.4.11 представлена кривая сейсмической опасности, показывающая вероятность превышения различных уровней сейсмической интенсивности за расчетный период 50 лет (Абасеев и др., 2022).

Представленные на рис. 4.11 оценки относятся к центральной части города, показывая средние периоды повторяемости сейсмических сотрясений различного уровня. Необходимо иметь в виду, что эти оценки получены без учета локальных грунтовых условий, то есть они представляют собой исходную сейсмичность территории, которая для территории Ашхабада не изменилась и, в соответствии с СНТ 2.01.08-2020, составляет 9* баллов с индексом повторяемости 2 (один раз в 1000 лет).

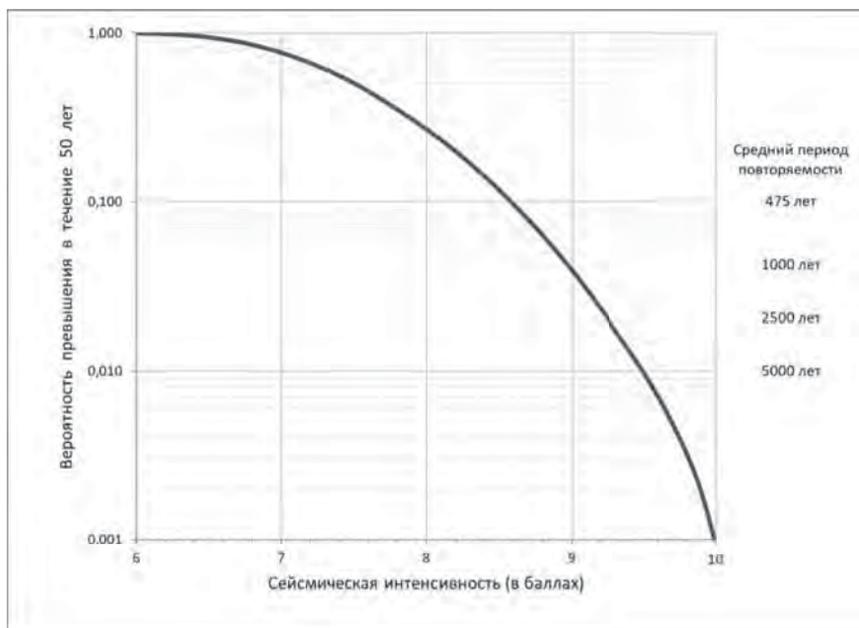


Рис. 4.11. Кривая сейсмической опасности для Ашхабада (Абасеев и др., 2022)

Что касается получения оценок расчетной сейсмичности различных участков территории, то, как уже подчеркивалось, для этого необходимо либо использовать оценки карты сейсмического микрорайонирования, либо, принимать сейсмичность площадок в соответствии с указаниями строительных норм в зависимости от категории грунтов по сейсмическим свойствам.

Для анализа элементов риска на исследуемой территории были использованы результаты паспортизации городской застройки Ашхабада, которая проводилась в период с сентября 2019 г. по октябрь 2021 г. силами Главного государственного проектного объединения (ГГПО) «Туркмендовлеттаслама».

На основе данных о зданиях существующей застройки, собранных в ходе проводившейся паспортизации, а также дополненных местными специалистами, была создана геоинформационная база данных и построена модель городской застройки.

В общей сложности созданная база данных включает в себя 8267 паспортов зданий, в том числе 5437 одноэтажных и 2585 многоэтажных жилых домов, а также 146 зданий дошкольных учреждений и 99 зданий общеобразовательных школ. Для всех зданий, содержащихся в созданной базе данных, полигональные объекты были пересчитаны в точечные объекты (приведены к центроидам).

По результатам обработки собранных паспортов зданий, для всех зданий был определен конструктивный тип в соответствии с классификацией строительных норм, что позволяет оценить ориентировочный класс уязвимости каждого здания и присвоить ему соответствующую функцию сейсмической уязвимости.

Сейсмическая уязвимость зданий существующей застройки описывалась с помощью графиков повреждаемости и функций уязвимости, представленных в главе III.

Кроме этого, для количественной оценки потенциального социально-экономического ущерба при землетрясениях местными специалистами были проведены специальные исследования и расчеты, в результате которых были получены оценки стоимости строительства разных типов зданий, а также оценки заполняемости зданий людьми в дневное и ночное время.

Все полученные оценки, включая сейсмическую опасность, а также уязвимость зданий и относящихся к ним социально-экономических ценностей, были интегрированы в созданную геоинформационную базу данных для использования при расчетах сейсмического риска на территории Ашхабада.

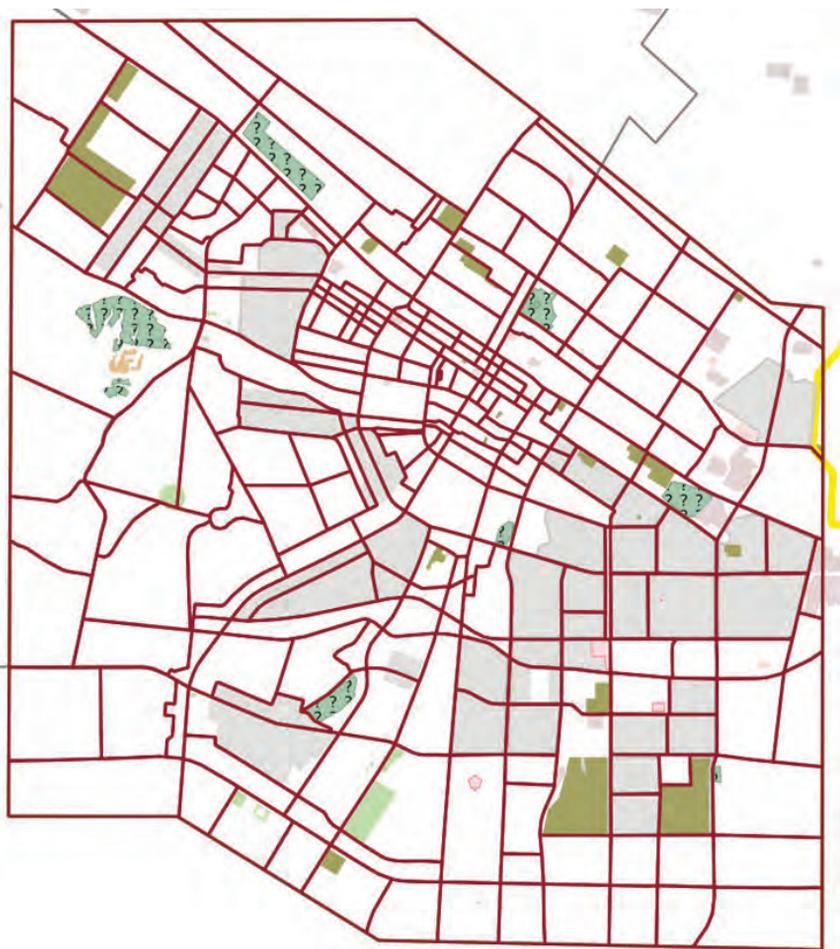


Рис. 4.12. Формирование расчетной сетки для расчетов риска на исследуемой территории

Для пространственного анализа сейсмического риска вся выделенная территория была разбита на расчетные ячейки (полигоны), как показано на рис. 4.12. Расчетная сетка была сформирована, следуя линиям дорог и городских улиц Ашхабада. Как видно из рис. 4.12, расчетные ячейки, различаются конфигурацией и размером, а также количеством зданий, которые расположены в пределах каждой из них. В общей сложности расчетная сетка включает в себя 263 ячейки (полигона).

Вся собранная и доступная информация, содержащаяся в базе данных, была проанализирована и распределена в городском пространстве в соответствии со сформированной расчетной сеткой, используя инструменты ГИС, в частности, оверлейное пересечение различных слоев в соответствии с пространственными координатами объектов, относящихся к рассматриваемой части городской застройки. Таким образом, все элементы риска, представленные в базе данных, получают привязку к ячейкам расчетной сетки.

В рамках построенной модели все характеристики опасности, уязвимости и ценностей, находящиеся в каждой расчетной ячейке, считаются равномерно распределенными в пределах ячейки. При этом свойства всех ячеек привязываются к координатам их центроидов.

При оценке повреждаемости зданий при сейсмических воздействиях, необходимо учитывать, что городская застройка представлена различными типами зданий, которые, как уже отмечалось, обладают различной сейсмической уязвимостью. Поэтому в расчетах риска необходимо рассматривать композиционный состав существующей застройки.

Композиционная модель жилой застройки Ашхабада, построенная в соответствии с данными проведенной паспортизации и уточненная с помощью дополнительной информации собранной местными специалистами, представлена на рис. 4.13. Отметим, что в расчетах риска для населения анализировались только жилые здания, учитывая данные об их заполняемости, причем рассматривалось полное заполнение зданий. Такая (или близкая к этому) ситуация соответствует ночному времени суток.

Как следует из представленных данных, в жилой застройке исследуемой территории в количественном отношении преобладают кирпичные здания (Тип 3). Вместе с тем, необходимо принимать во внимание, что в этой диаграмме большая часть зданий представлена так называемыми «плановыми» домами с небольшим количеством жителей, в то время как значительная часть населения Ашхабада проживает в новых многоквартирных домах. Поэтому из сравнения диаграмм, представленных на рис. 4.13

и рис.4.14, можно сделать вывод, что большая часть населения проживает в зданиях, относящихся к типам 4, 5, 7 и 8.

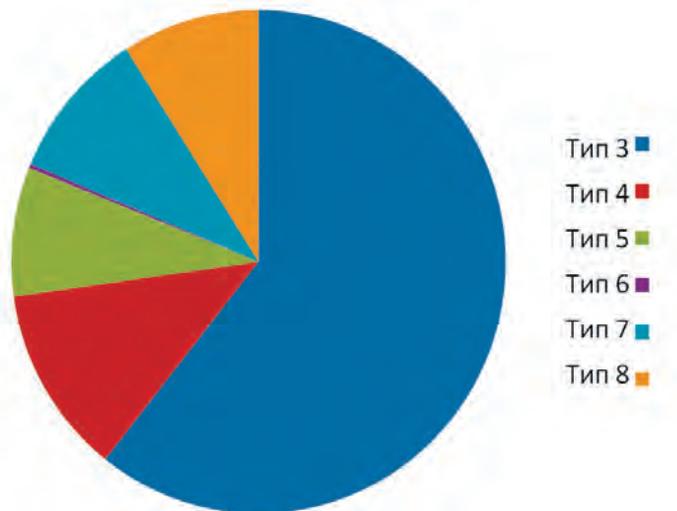


Рис. 4.13. Композиционная модель жилой застройки исследуемой территории Ашхабада, представленная в типах зданий

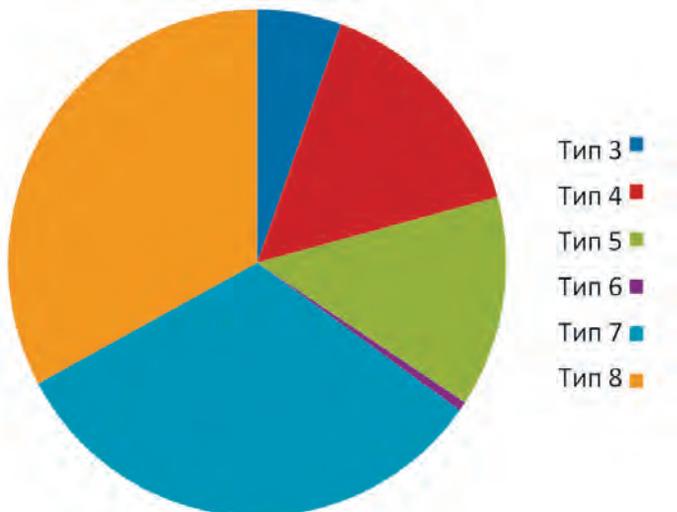


Рис. 4.14. Композиционная модель распределения населения, проживающего в разных типах зданий

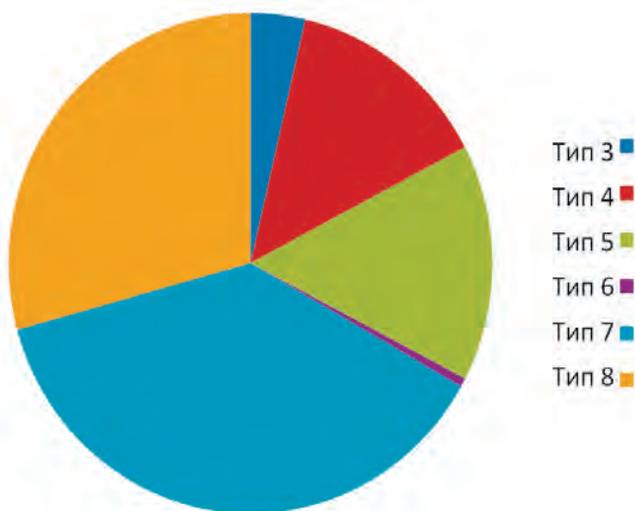


Рис. 4.15. Композиционная модель распределения общей стоимости различных типов зданий на исследуемой территории Ашхабада

В дополнение к этому диаграмма, представленная на рис. 4.15, показывает оценку стоимостного распределения различных типов зданий на исследуемой территории (стоимостная оценка была получена местными специалистами, исходя из актуальной рыночной стоимости различных типов зданий). В стоимостном выражении наибольший вклад в общую строительную стоимость городской застройки также вносят типы зданий 4, 5, 7 и 8. Представленные выше данные использовались при расчетах вероятного социально-экономического ущерба от потенциальных землетрясений.

Геопространственное моделирование.

Очевидно, что уровень сейсмического риска не является величиной постоянной в пределах исследуемой территории. На величину риска влияют как уровень сейсмической опасности (который существенным образом зависит от локальных грунтовых условий в различных частях города), так и пространственное распределение элементов городской застройки (с которыми непосредственно связаны как характеристики сейсмической уязвимости зданий, так и концентрация ценностей, подверженных риску).

Следует заметить, что уровень риска может существенно изменяться не только в пространстве, но и во времени, имея в виду, как изменения сейсмических свойств подземной среды (фактор опасности), так и изменение надземного пространства (фактор уязвимости и ценностей, подверженных риску). В проведенном исследовании временная изменчивость подобных факторов и их влияние на изменение уровня риска не рассматривалась, однако может быть рекомендовано регулярное проведение повторных исследований по оценке (микрорайонированию) сейсмического риска с тем же временным интервалом, что и работы по микрорайонированию сейсмической опасности. С той же целью необходимо регулярное обновление и дополнение данных паспортизации городской застройки.

Представленная ниже оценка пространственного распределения сейсмического риска на территории Ашхабада выполнялась на основе новой карты сейсмического микрорайонирования, разработанной специалистами ИСФА.

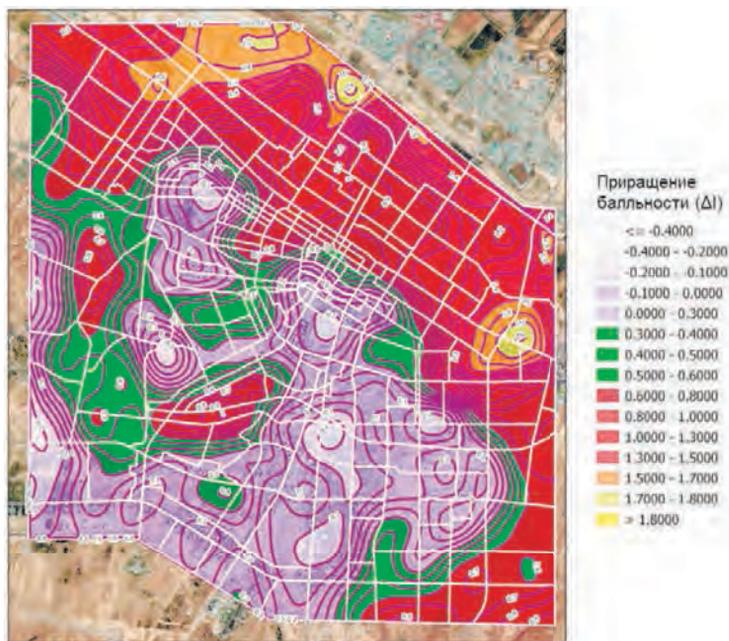


Рис. 4.16. Оценка распределения приращений сейсмической интенсивности (ΔI) за счет локальных грунтовых условий и эффекта грунтовых вод для территории Ашхабада (Абасев и др., 2022)

На рис. 4.16 показана оценка распределения приращений сейсмической интенсивности за счет локальных грунтовых условий и эффекта грунтовых вод (Абасеев и др., 2022), которая совмещена с расчетной сеткой ГИС.

Поскольку новая карта СМР для территории города построена в приращениях балльности, для получения расчетной сейсмичности различных участков территории эти приращения должны добавляться к оценке исходной сейсмичности для Ашхабада.

Новая карта сейсмического микрорайонирования также была интегрирована в геоинформационную базу данных, причем в рамках построенной пространственной модели уровень опасности пересчитывался применительно к координатам центров всех ячеек расчетной сетки и считается равномерно распределенным в пределах каждой ячейки.

На рис. 4.17 показано распределение сейсмической опасности в абсолютных значениях интенсивности (балльности), определяемой суммированием исходного уровня сейсмичности для Ашхабада (9 баллов) и соответствующих приращений балльности.

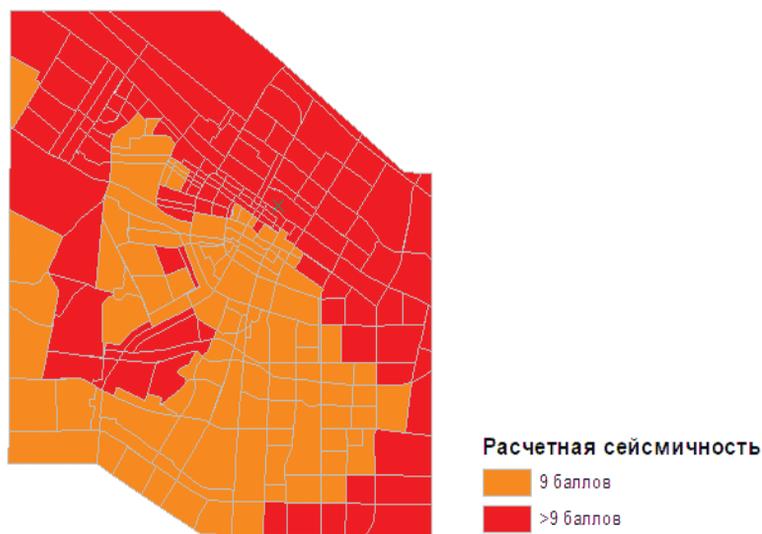


Рис. 4.17. Оценка распределения сейсмической опасности на исследуемой территории (в баллах MSK-64).

Следует отметить, что в соответствии с положениями строительных норм для описания уровня сейсмической опасности используются целочисленные значения балльности. (Все оценки опасности представлены в баллах шкалы MSK-64).

Как уже отмечалось, в соответствии с данными паспортизации, дополненными и уточненными местными специалистами, была построена модель городской застройки. В частности, используя доступные адресные данные по каждому объекту городской застройки, было определено количество зданий разных конструктивных типов, содержащихся в различных полигонах (ячейках) расчетной сетки.

Пространственное распределение общего количества зданий в каждой расчетной ячейке в пределах исследуемой территории показано на рис. 4.18.

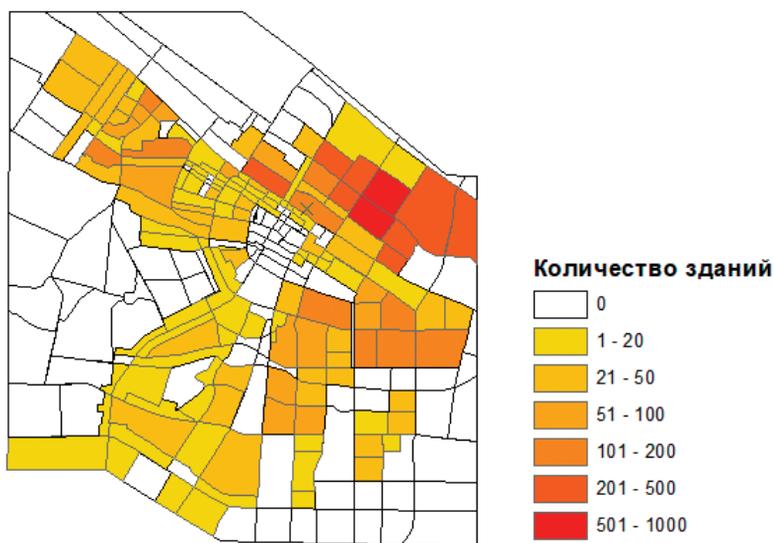


Рис. 4.18. Количественное распределение жилых зданий в ячейках исследуемой территории

Важно помнить, что в рамках данного подхода каждая ячейка представляет собой расчетную единицу, в пределах которой все параметры считаются равномерно распределенными. В том

числе одним из расчетных параметров является общее количество зданий в каждой ячейке, но при этом не учитывается их пространственное распределение в пределах ячеек (участков городской застройки). На будущих этапах исследований, при наличии более точной и подробной информации о зданиях существующей застройки, может быть рекомендовано сгущение расчетной сетки (путем уменьшения размеров ячеек), что может повысить точность и детальность полученных результатов.

Для получения оценок прямого ущерба, вызванного повреждением зданий при землетрясениях, используются стоимостные оценки разных типов зданий. Как уже отмечалось, эти оценки были определены местными специалистами исходя из актуальной рыночной стоимости различных типов зданий. С их помощью была построена пространственная модель распределения стоимости жилых зданий (выраженная в долларах США), подверженных сейсмическому риску (*Рис. 4.19*).

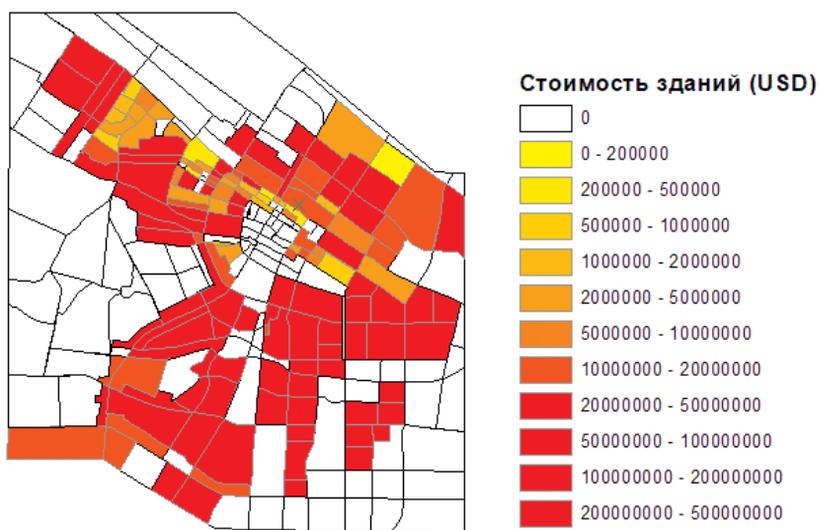


Рис. 4.19. Количественное распределение стоимости жилых зданий в ячейках исследуемой территории

Кроме этого было выполнено пространственное моделирование подверженности населения сейсмическому риску. Оценки пространственного распределения жителей на исследуемой территории рассматривались с учетом собранной информации о характеристиках различных типов жилых домов, в том числе с учетом количества этажей и квартир в этих зданиях, а также среднего количества жильцов, проживающих в них.

Таким образом, была построена пространственная модель, показывающая количественное распределение жителей в ячейках исследуемой территории (Рис. 4.20). Важно отметить, что представленные оценки соответствуют полной заполняемости жилых зданий, что подразумевает ночное время суток.

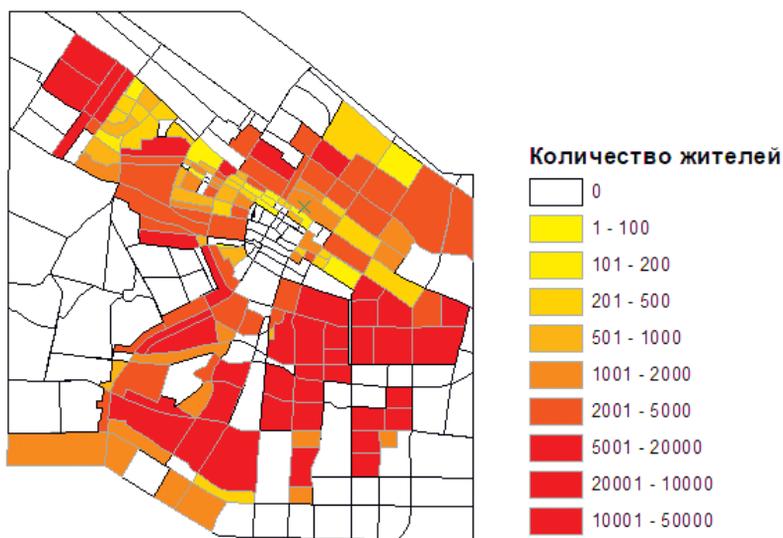


Рис. 4.20. Количественное распределение жителей в ячейках исследуемой территории (в ночное время)

Представляет интерес сравнение данных, показанных на рис. 4.18, рис.4.19 и рис. 4.20. Хотя общее количество жилых зданий больше в северо-восточной части города (Рис. 4.18), однако, поскольку в этих районах преобладает малоэтажная жилая застройка (плановые дома), суммарные стоимостные оценки зданий в

этих районах несколько ниже по сравнению с другими районами города, застроенными современными зданиями (Рис. 4.20).

Примерно такой же закономерности следует распределение количества жителей на различных участках исследуемой территории (Рис. 4.20), заметно повышаясь в ячейках с многоэтажной застройкой.

Сейсмическая уязвимость застройки в каждой расчетной ячейке исследуемой территории определяется композиционным содержанием различных конструктивных типов зданий (Табл. 3.6). Эта информация основана на данных проведенной паспортизации. Соответственно, в качестве расчетных атрибутов в каждой ячейке ГИС задается количественное содержание различных типов зданий (в процентном выражении), которое также пересчитывается в классы сейсмической уязвимости (в соответствии с оценками табл. 3.9).

Очевидно, что композиционный состав застройки (как по типам зданий, так и по классам сейсмической уязвимости) в различных ячейках территории может быть весьма неоднородным. Поэтому для сравнительной пространственной характеристики уязвимости различных участков городской застройки, в которых могут присутствовать здания различных классов уязвимости в различной пропорции, используется средний показатель уязвимости (Mean Vulnerability Ratio, MVR), величина которого варьирует от 1 (низкая уязвимость) до 6 (высокая уязвимость). Описание и количественное определение этого параметра представлено в главе III.

Сравнительное распределение сейсмической уязвимости жилых зданий по среднему показателю уязвимости (MVR) в ячейках исследуемой территории показано на Рис. 4.21 (нулевое значение этого показателя означает отсутствие зданий на данном участке).

При анализе риска представляет интерес сравнение пространственного распределения опасности, уязвимости и подверженности (концентрации ценностей) на исследуемой территории. В частности, можно видеть, что уровень сейсмической опасно-

сти (Рис. 4.17) особенно высок на севере и востоке этой территории, где приращение сейсмической интенсивности обусловлено неблагоприятными грунтовыми условиями. В то же время, как видно из рис. 4.21, в северо-восточной части этой территории расположены здания, которые по своему конструктивному решению относятся к более уязвимым типам. Исходя из этого, можно ожидать, что именно в этой части города будут получены наиболее высокие оценки повреждаемости зданий. Что касается уровня риска (потенциальных социально-экономических потерь), дополнительно к оценкам повреждаемости зданий необходимо рассматривать распределение ценностей, подверженных риску, включая как стоимость зданий, так и количество проживающих в них жителей.

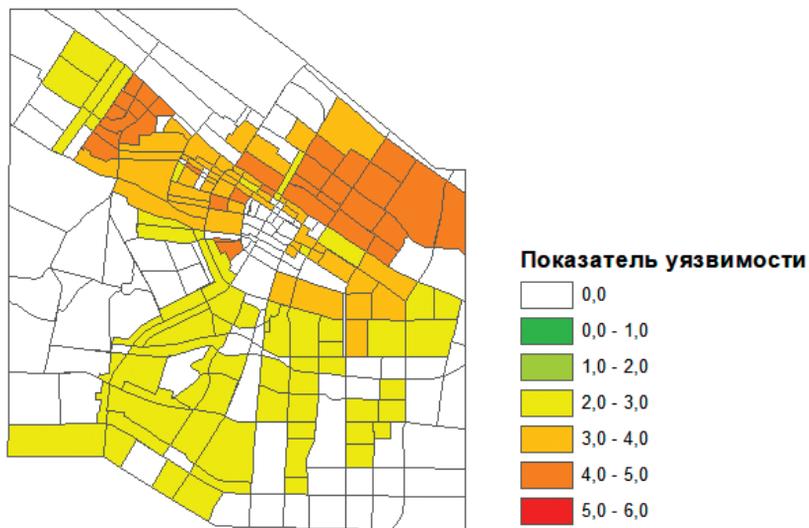


Рис. 4.21. Сравнительное распределение сейсмической уязвимости в различных ячейках исследуемой городской территории

Вычислительный алгоритм и результаты расчетов риска.

Геопространственное моделирование компонентов риска и все численные расчеты выполнялись на платформе ГИС с использованием инструментария ESRI ArcGIS и QGIS. Построен-

ные пространственные модели сейсмической опасности, подверженности и уязвимости представляют собой соответствующие слои ГИС с расчетными данными (атрибутами), которые последовательно комбинируются в ходе вычислительного процесса, выполняемого в соответствии с методикой, описанной выше (см. раздел 4.2). Отметим, что с помощью разработанных вычислительных подпрограмм все расчеты автоматически выполняются в каждой ячейке расчетной сетки ГИС.

Количественная оценка сейсмического риска для исследуемой территории выполнялась с использованием двух подходов:

- на основе карты сейсмического микрорайонирования;
- на основе сценарных землетрясений.

Ниже последовательно рассмотрен каждый из этих подходов.

Для сравнительной оценки пространственного распределения риска используется слой ГИС, содержащий оценки сейсмической опасности по данным проведенного сейсмического микрорайонирования (СМР) для территории Ашхабада (Рис. 4.17).

Здесь стоит отметить, что хотя оценки сейсмической опасности основаны на вероятностных расчетах (см. Главу 2) и результаты расчетов ВАСО в общем виде характеризуются кривыми сейсмической опасности (Рис. 2.10), однако традиционно карты районирования строятся для некоторого фиксированного уровня вероятности. То есть все точки районируемой территории характеризуются значением показателя опасности (интенсивности или параметра колебаний), соответствующим единому выбранному значению вероятности (периода повторяемости).

Таким образом, поскольку в рамках данного подхода в каждой расчетной ячейке определено одно значение сейсмической интенсивности (Рис. 4.17), вычисление оценок повреждаемости зданий (см. Формулу 4.4.) заметно упрощается.

Для количественной оценки повреждаемости зданий комбинируются оценки сейсмической опасности и сейсмической уязвимости (в соответствии с композиционным составом застройки в каждой ячейке ГИС). При этом используются соответ-

ствующие матрицы вероятности повреждения, представленные в табл. 3.5 (для классов сейсмической уязвимости) и табл. 3.7 (для конструктивных типов зданий). В соответствии с этими таблицами в зависимости от уровня расчетной интенсивности и композиционного состава застройки определяется количественное распределение зданий, получивших различные степени повреждения от $d = 0$ до $d = 5$ (в процентах от общего количества зданий в каждой расчетной ячейке).

Далее, в соответствии с принятыми функциями последствий (см. Табл.4.1 и Рис. 4.3), последовательно рассчитываются оценки ожидаемых прямых потерь. Получаемые расчетные оценки включают среднее значение прямого материального ущерба, связанного с повреждением конструкций зданий, а также средние значения травматизма и вероятных человеческих потерь.

На рис.4.22 представлены оценки повреждаемости жилых зданий в различных ячейках расчетной сетки, которые получены из совместного рассмотрения сейсмической опасности и сейсмической уязвимости. Оценки представлены в виде среднего уровня повреждений (Mean Damage Ratio, MDR) в процентном выражении от общей стоимости зданий.

Наиболее высокие оценки вероятной повреждаемости получены в северной части исследуемой территории Ашхабада, где имеет место совпадение наиболее высокого уровня сейсмической опасности (более 9 баллов) и наиболее высоких оценок сейсмической уязвимости зданий жилой застройки (представленных менее сейсмостойкими типами). Как показывает анализ, на этих участках территории можно ожидать не только значительные конструктивные повреждения зданий (3 и 4 степени), но и их полное разрушение (5 степень).

Показанные на рис.4.22 оценки повреждаемости зданий представлены в процентном выражении от общей строительной стоимости. Для получения оценок потенциальных социально-экономических потерь в абсолютном выражении, следуя общепринятой методологии, необходимо ввести в расчет соответствующую величину подверженности (ценностей, подверженных

рisku). При получении оценок экономического риска под ценностями подразумеваются количественные оценки стоимости строительства жилых зданий в ячейках исследуемой территории (Рис. 4.19). При расчетах социального риска в качестве подверженных ценностей рассматриваются оценки количества жителей в каждой ячейке исследуемой территории (Рис. 4.20).

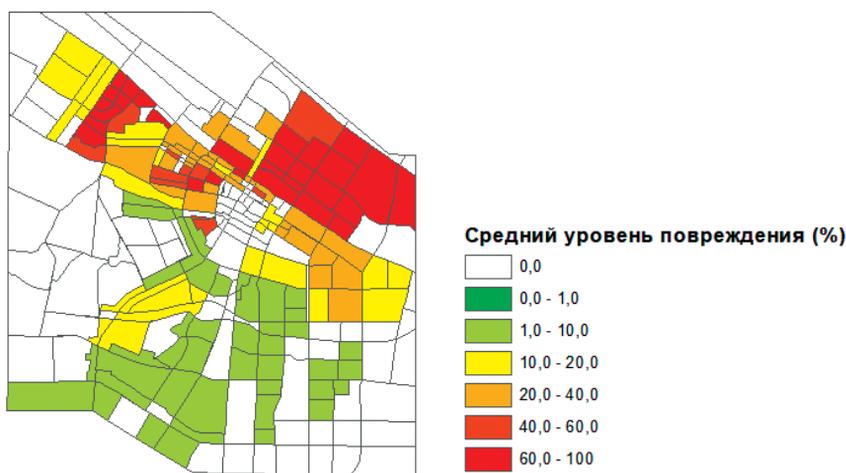


Рис. 4.22. Сравнительное распределение потенциальной повреждаемости городской застройки при землетрясениях

Анализ качественной картины пространственного распределения полученных оценок сейсмического риска представляет как учебно-методический, так и практический интерес.

На рис. 4.23 показано сравнительное распределение уровня потенциальных потерь от землетрясений на разных участках исследуемой территории (от довольно низкого уровня, показанного желтым цветом, до относительно высокого уровня, выделенного красным).

Отметим, что в учебных целях здесь представлена только качественная картина пространственного распределения риска, рассматривая совокупную комбинацию оценок повреждаемости и ценностей, подверженных риску. Более детальная и развернутая информация о результатах расчетов сейсмического риска

для территории города (включая количественные оценки вероятных потерь) содержится в отчетах, которые находятся в фондах ИСФА (Тягунов, 2022).



Рис. 4.23. Сравнительное распределение экономического (а) и социального (б) сейсмического риска (в терминах индекса риска)

Проведенное сравнение позволяет проанализировать вклад каждого из факторов риска (опасности, уязвимости, подверженности) в общий уровень сейсмического риска в каждой расчетной ячейке.

Относительное повышение уровня риска в тех или иных ячейках можно объяснить либо повышенным уровнем сейсмической опасности за счет локальных грунтовых условий, либо повышенной уязвимостью типов зданий на этом участке, либо повышенной концентрацией соответствующих ценностей, подверженных риску.

Анализируя результаты, представленные на рис. 4.23 (а), можно заметить, что оценки экономического риска (отражающие потенциальные материальные потери, связанные с повреждением строительных конструкций) распределены в пределах рассматриваемой территории относительно равномерно. Некоторое по-

вышение уровня риска наблюдается в центральных частях города, что, вероятно, можно объяснить более высокой строительной стоимостью типов зданий, расположенных на этих участках. В то же время оценки социального риска (Рис. 4.23, б) имеют явно повышенные значения на северо-востоке территории. Это, вероятно, можно объяснить тем, что на данных участках в результате пространственного совпадения высокого уровня сейсмической опасности (за счет неблагоприятных грунтовых условий) и зданий с относительно высокой сейсмической уязвимостью можно ожидать наибольшего числа высоких степеней повреждения, в том числе разрушения зданий при сильных землетрясениях.

Очевидно, что при разработке муниципальной программы управления сейсмическим риском для территории Ашхабада участкам с повышенным уровнем риска должно быть уделено особое внимание.

Помимо пространственного анализа риска, выполняемого на основе карты сейсмического микрорайонирования, практический интерес представляет также и сценарный подход.

Разработка сценариев разрушительных землетрясений и оценка их социально-экономических последствий является весьма полезным инструментом для оценки сейсмического риска территорий и подготовки к вероятным будущим землетрясениям и широко используется исследователями в современной практике при решении задач управления риском.

В общем виде алгоритм для генерирования сценариев землетрясений и оценки их последствий включает в себя несколько этапов, включая:

- оценку параметров очага землетрясения;
- оценку поверхностного сейсмического эффекта, вызванного землетрясением;
- оценку последствий землетрясения, включая повреждения застройки и оценку вероятных потерь.

При выборе параметров сценарных сейсмических событий в качестве исходных данных могут рассматриваться как параметры

реальных прошлых землетрясений в регионе, так и параметры гипотетических потенциальных землетрясений, определяемые в соответствии с имеющимися геодинамическими и сеймотектоническими оценками, формирующими сейсмическую опасность на данной территории. Кроме того, в рамках данного подхода также могут использоваться оперативные данные о произошедших землетрясениях.

С одной стороны, если сценарное (гипотетическое) землетрясение генерируется для исследовательских целей, оценка и выбор его параметров должны определяться национальными специалистами-сейсмологами, что позволит получить достоверные оценки сейсмических воздействий и сейсмического эффекта.

С другой стороны, при рассмотрении реально произошедшего сейсмического события, предварительные оценки его параметров определяются национальными, региональными или глобальными службами регистрации землетрясений. Оперативные донесения служб мониторинга и регистрации сейсмических событий содержат информацию о времени, месте (географических координатах) и силе (энергетических характеристиках) землетрясений в режиме реального времени. Несмотря на то, что в предварительных оценках этих параметров возможны неточности, оперативность их получения и использования является важным фактором повышения эффективности работы служб быстрого реагирования в чрезвычайных ситуациях и спасательных отрядов непосредственно после сейсмического события.

На основе полученных данных о координатах очага землетрясения и его магнитуде, можно приблизительно оценить интенсивность сотрясений на поверхности земли как в эпицентре землетрясения, так и на удалении от него. Для этого используются специальные уравнения, учитывающие затухание параметров колебаний грунтов (или сейсмической интенсивности) с расстоянием (например, Шебалин, 1968, Vindi et al., 2011, Артыков и др., 2020).

Выбор подходящих уравнений для оценки затухания сейсмических колебаний в значительной мере определяется региональными сеймотектоническими и геологическими условиями. Нами рассматриваются уравнения для сейсмической интенсивности.

Для построения изосейст макросейсмического поля (линий, которые оконтуривают зоны с равной интенсивностью сотрясений) на территории стран бывшего СССР широко используется уравнение Н. В. Шебалина (Шебалин, 1968).

$$I = b * M - v * \lg R + c. \quad (4.5)$$

Где:

I – сейсмическая интенсивность, выраженная в баллах макросейсмической шкалы MSK-64;

M – магнитуда землетрясения (Ms);

R – гипоцентральное расстояние (км), определяемое по формуле:

$$R = \sqrt{\Delta^2 + H^2}. \quad (4.6)$$

Где:

Δ – удаление точки наблюдения от эпицентра землетрясения (эпицентральное расстояние) в км;

H – глубина очага землетрясения в км;

b, v, c – коэффициенты, зависящие от региональных условий.

Для территории Туркменистана, с учетом численных значений коэффициентов, учитывающих региональные особенности территории, уравнение макросейсмического поля может быть записано в следующем виде (Кондорская, Шебалин, 1977, Голинский, 1977, 2000, Петрова, 2009):

$$I = 1,5 * M - 3,8 * \lg R + 3,5. \quad (4.7)$$

В наших дальнейших расчетах для построения макросейсмического поля сценарных землетрясений используется это уравнение. После задания исходных параметров землетрясения расчетный алгоритм, интегрированный в геоинформационную

систему, рассчитывает оценки сейсмической интенсивности для каждой ячейки расчетной сетки с привязкой к координатам центров расчетных ячеек.

В качестве сценарных событий нами рассматривалось несколько землетрясений различной магнитуды, очаги которых были приурочены к существующим сейсмогенным зонам вокруг Ашхабада. Потенциальные источники и параметры этих гипотетических землетрясений были определены специалистами ИСФА (Абасеев и др., 2022).

В частности, были рассмотрены два сейсмических события, используя параметры реального исторического землетрясения, которое произошло в Туркменистане 15 ноября 1968 года ($\varphi = 38^\circ, 0' N$ и $\lambda = 58^\circ, 3' E$, $M = 5,6$, $H = 18$ км) (Голинский и др., 1972). При этом первое из этих двух рассмотренных сценарных событий (с магнитудой $M = 5,6$), основанное на данных реальных наблюдений, использовалось для валидации разработанной расчетной модели. Второе гипотетическое землетрясение (отличающееся более высокой магнитудой $M = 6,6$) было выбрано для сравнения.

Для каждого из рассмотренных землетрясений рассчитывалось поле изосейст, в соответствии с которым были определены значения сейсмической интенсивности в ячейках расчетной сетки. Далее, комбинируя параметры сейсмических воздействий и оценки сейсмической уязвимости (следуя вышеописанному расчетному алгоритму), во всех расчетных ячейках определяется средний уровень повреждений (в процентах от общей строительной стоимости зданий). На рис.4.24 и рис.4.25 показано сравнение оценок повреждаемости существующей жилой застройки от этих двух гипотетических землетрясений.

Как и можно было ожидать, оценки повреждаемости значительно выше при втором, гораздо более сильном землетрясении. В обоих случаях наиболее высокие оценки повреждаемости зданий получены для северной части города, которая характеризуется неблагоприятными грунтовыми условиями и более уязвимыми типами зданий.

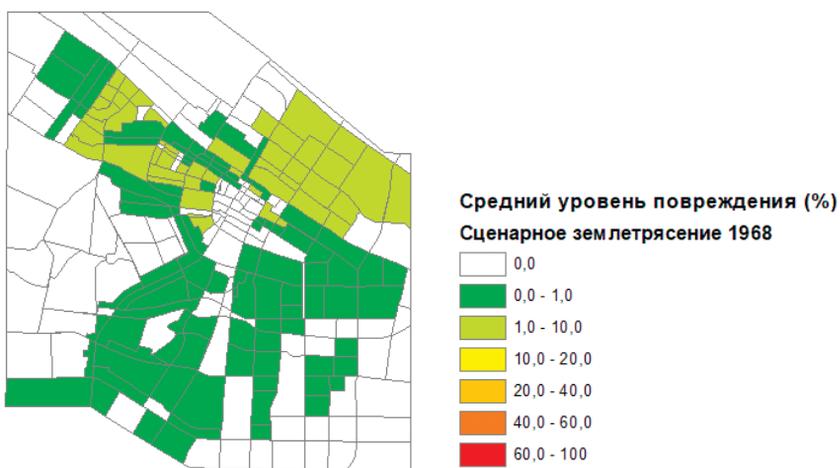


Рис. 4.24. Оценка повреждаемости зданий от сценарного землетрясения с магнитудой $M = 5,6$

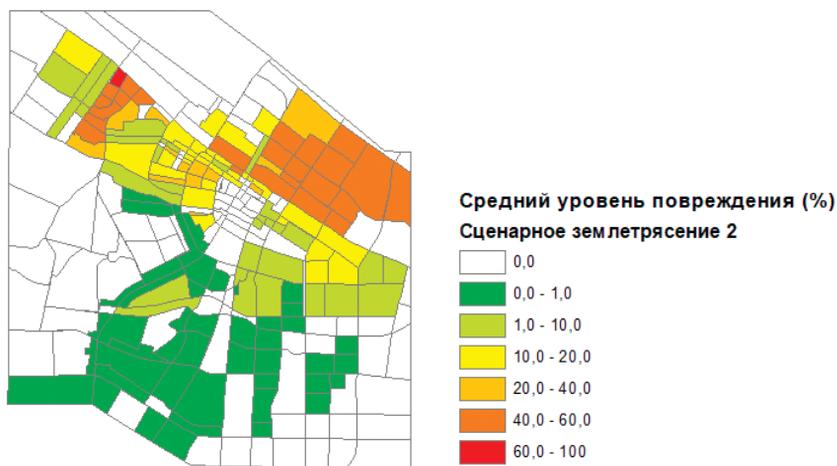


Рис. 4.25. Оценка повреждаемости зданий от сценарного землетрясения с магнитудой $M = 6,6$

Помимо представленных выше оценок ущерба, который рассчитывается для выбранных сценарных (гипотетических) землетрясений, разработанная геоинформационная система для

Ашхабада, позволяет также оценивать возможные потери и их пространственное распределение в оперативном режиме и может служить важным практическим инструментом для повышения эффективности работы городских служб быстрого реагирования и спасения при чрезвычайных ситуациях, вызванных сильными землетрясениями.

4.5. Мульти-риски, их оценка и сравнение

Учитывая опыт и уроки прошлых сильных землетрясений, а также других природных и техногенных катастроф, в научных и прикладных исследованиях последних лет происходит заметное смещение парадигмы от отдельных видов опасностей к их комплексному рассмотрению. Это обусловлено возможным взаимодействием и взаимовлиянием различных видов опасностей, в частности, известно, что сильные землетрясения могут выступать триггером для других видов опасностей, например, таких как цунами, обвалы, оползни, пожары. Кроме этого, вызванное сейсмическими воздействиями разрушение производственных объектов, связанных с опасными технологическими процессами или хранением опасных веществ, может привести к чрезвычайным ситуациям техно-природного характера.

Современный подход к так называемой проблеме мульти-рисков подразумевает необходимость комплексного рассмотрения различных видов опасностей (мульти-опасностей) в случае их возникновения на исследуемых территориях, в том числе их возможное взаимодействие, а также развитие так называемых каскадных (или многоуровневых) эффектов.

Прямое сравнение различных видов опасностей, как правило, не представляется возможным в силу их различного проявления и механизма воздействия. Что касается риска, уровень которого выражается в терминах потерь (экономических или социальных), может быть проведено сравнение различных видов рисков.

На Рис.4.26 показан ставший классическим пример сравнения рисков для территории Кельна (Германия), где сравниваются вероятные потери от трех различных видов природных опасностей – землетрясений, ураганов и наводнений (Grünthal et al, 2006). На этом графике представлены три кривые рисков, показывающие вероятность превышения экономических потерь от каждого из рассмотренных видов опасностей.

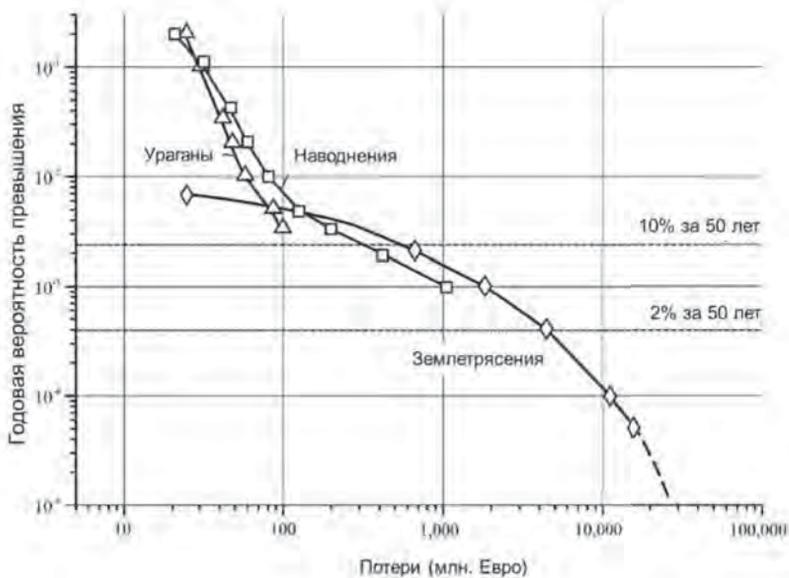


Рис.4.26. Сравнение кривых экономического риска, связанных с различными видами опасностей – ураганами, наводнениями и землетрясениями для территории Кельна (Германия)

Как можно видеть, в краткосрочной перспективе явно преобладает риск от ураганов и наводнений, которые являются более частыми событиями на данной территории. Однако в долгосрочной перспективе, безусловно, доминирует сейсмический риск, который, очевидно, связан с более редкими событиями, обладающими, однако, гораздо более высоким разрушительным потенциалом.

Рассматривая возможные подходы к количественному анализу мульти-рисков, следует различать, с одной стороны, риски,

связанные с отдельными видами опасностей, эффекты которых проявляются без видимого взаимодействия, а, с другой стороны, риски, сопровождающие такие опасности, которые могут взаимодействовать и влиять друг на друга, (см., например, Kappes et al, 2012, Fleming et al, 2016, Trogrlić et al, 2024).

В качестве первого примера можно привести три вида опасностей, рассмотренных выше, при условии достаточного временного интервала между проявлением их эффектов, что подразумевает полное восстановление среды жизнедеятельности (включая возвращение к исходному уровню подверженности и уязвимости) после каждого из произошедших событий. В этом случае можно проводить анализ этих рисков отдельно. Однако, в случае совпадения различных опасностей во времени, очевидно, что совокупный эффект их воздействия может возрасти. Это может произойти как за счет возникновения дополнительных факторов опасности (триггерный эффект), так и за счет изменения факторов подверженности и/или уязвимости.

В качестве примера взаимодействия природных мульти-рисков можно привести резкое возрастание фактора опасности оползнеобразования при совместном действии повышенных осадков и сейсмических колебаний. Другим известным примером может служить разрушение защитных береговых дамб в результате землетрясения, что ведет к повышению риска затопления территорий в случае наводнения. Еще одним примером мульти-рисков, часто встречающимся в реальной практике, является коррозия материалов конструкций, подверженных опасному воздействию агрессивных сред, что может приводить к снижению их прочностных свойств, а значит к повышению уязвимости. Повторное воздействие однотипных опасностей также следует рассматривать в контексте мульти-рисков (например, воздействие афтершоков на здания и сооружения уже получившие повреждения в результате сильного землетрясения и, следовательно, тем самым ставшие более уязвимыми).

В подобных случаях, примеров которым можно привести очень много, проблема анализа мульти-рисков значительно усложняется, требуя особого подхода, учитывающего возникновение различных опасностей во времени и их влияние друг на друга.

Проведение качественного и/или количественного сравнения различных видов рисков (мульти-рисков), связанных с различными видами опасностей, существующих на исследуемой территории, позволит выявить преобладание той или иной опасности (в краткосрочной или долгосрочной перспективе) и приоритизировать мероприятия по управлению риском.

Вопросы для самоконтроля по четвертой главе

1. Что такое сейсмический риск?
2. Какие факторы определяют уровень риска?
3. Какие виды неопределенностей существуют в задачах оценки риска?
4. Что такое функции потерь (функции последствий)?
5. Какие подходы к оценке сейсмического риска вы знаете?
6. Какие элементы и этапы вычислительного алгоритма сейсмического риска вы знаете?
7. Какие три основных направления территориальной оценки сейсмического риска вы знаете?
8. Что такое среднегодовые потери?
9. Что такое удельные среднегодовые потери?
10. Что такое максимально возможные потери?
11. Что такое мульти-риски? Приведите их примеры.

У ГЛАВА

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ

5.1. Цикл сейсмических катастроф

Землетрясения, как и все стихийные бедствия, являются периодически повторяющимися событиями и могут, следовательно, быть описаны в терминах цикла катастроф (Рис. 5.1).

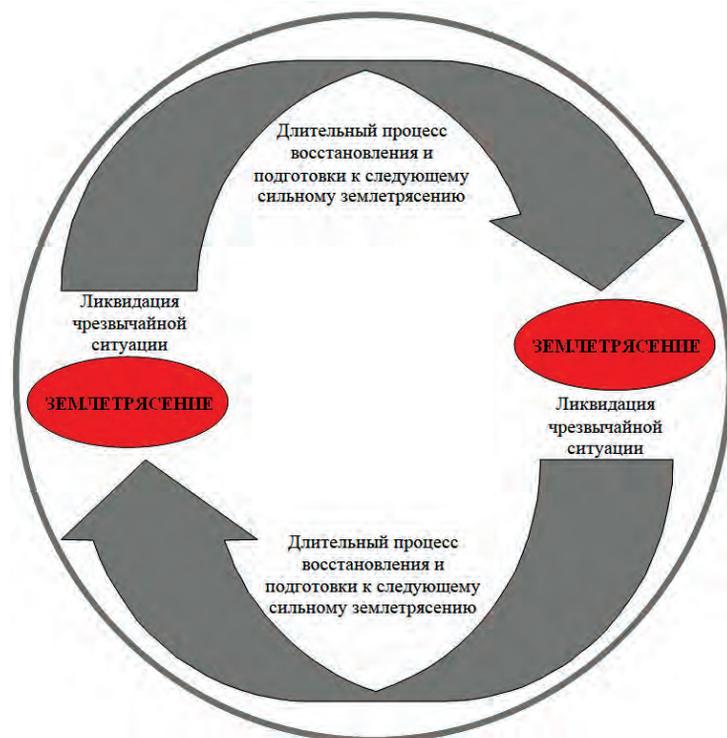


Рис.5.1: Цикл сейсмических катастроф

Современная сейсмологическая наука не может предсказать, в какой именно точке временного отрезка, соединяющего два последующих сейсмических события, находится общество и насколько отдалено во времени следующее сильное землетрясение.

Само землетрясение, как грозное природное явление, предотвратить невозможно, однако общество может подготовиться к нему, чтобы предотвратить социально-экономическую катастрофу.

Поэтому на этапе нормального функционирования общества (между сейсмическими событиями) жизненно важной задачей является подготовка к будущим сильным землетрясениям и разработка программы повышения сейсмической безопасности (уменьшения сейсмического риска).

Проживая на сейсмически активных территориях, в условиях, когда риск неизбежен, общество должно научиться управлять существующим риском и минимизировать его. Поэтому программа сейсмобезопасности обязательно должна включать в себя элементы управления сейсмическим риском. При этом программа управления риском должна рассматривать не только вопросы того, что нужно сделать до того как землетрясение произойдет, но также и то, как необходимо действовать в условиях чрезвычайной ситуации непосредственно после происшедшего землетрясения, а также предусматривать как восстанавливать город после землетрясения.

5.2. Методы управления риском

Как было рассмотрено выше, риск формируется за счет существующей опасности и элементов риска, подверженных этой опасности (для описания элементов риска, подверженных опасности, часто используется также термин «подверженность»). При этом каждый из элементов риска характеризуется уязвимостью по отношению к данной опасности и ценностью, которая может быть утрачена в результате воздействия опасности.

Говоря о сейсмическом риске, приходится констатировать, что на сейсмически опасных территориях, где осуществляется человеческая жизнедеятельность, неизбежно присутствует риск и прежде чем принимать решения по управлению риском, необходимо оценить его количественный уровень.



Рис. 5.2. Схема анализа и управления риском

Анализ и количественная оценка сейсмического риска проводятся на основе полученных оценок сейсмической опасности, подверженности и уязвимости, после чего, необходимые управленческие и инженерные решения по управлению риском принимаются исходя из рассмотрения полученных оценок существующего уровня риска, а именно, является ли он приемлемым или нет.

Методы управления риском зависят от уровня и характера решаемых задач. Так, на уровне страны основным управленче-

ским инструментом являются нормативно-правовые, организационно-административные и экономические методы, тогда как на локальном уровне, в основном, применяются инженерно-технические методы (Рагозин, 2003).

Нормативно-правовые методы управления риском включают в себя разработку и применение различного рода нормативных общегосударственных, региональных, и ведомственных документов (законов, норм и правил, стандартов и т.п.), нацеленных на оценку и снижение риска.

Организационно-административные методы управления риском подразумевают обеспечение системы контроля и мониторинга за источниками и объектами риска, разработку мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций и снижению возможного ущерба от землетрясений и ликвидации их последствий.

Экономические методы включают в себя, с одной стороны, заблаговременное целевое финансирование мероприятий по снижению риска со стороны государственных органов, а, с другой стороны, создание благоприятных условий для предпринимателей и развития их заинтересованности в реализации мероприятий по снижению риска и обеспечению сейсмобезопасности.

К экономическим методам можно также отнести развитие страхования, которое является весьма действенным механизмом компенсации экономического ущерба от природных рисков, широко применяемым в мировой практике.

Инженерно-технические методы управления риском, как правило, подразумевают проведение мероприятий, направленных непосредственно на устранение существующей угрозы или на минимизацию возможных последствий. Инженерные мероприятия могут включать в себя защиту как от первичных эффектов (усиление конструкций зданий), так и от вторичных эффектов землетрясений (например, селезащитные, противоползневые, противопожарные, противопросадочные мероприятия и др.).

Весьма важным инструментом управления риском является просветительская и образовательная деятельность, которая необходима при проживании в сейсмоопасных районах. Эта деятель-

ность должна охватывать обязательное включение предметов по сейсмическому риску в программы учебных заведений. Кроме того, повышению уровня знаний, а значит снижению социальной уязвимости, может способствовать выпуск специальных информационных брошюр, а также проведение образовательных тренингов для руководителей различного уровня, средств массовой информации и широких слоев населения.

	Очень малые последствия	Малые последствия	Средние последствия	Серьезные последствия	Очень серьезные последствия
Очень низкая вероятность	Низкий риск	Низкий риск	Низкий риск	Низкий риск	Умеренный риск
Низкая вероятность	Низкий риск	Низкий риск	Низкий риск	Умеренный риск	Умеренный риск
Средняя вероятность	Низкий риск	Низкий риск	Умеренный риск	Умеренный риск	Критический риск
Высокая вероятность	Низкий риск	Умеренный риск	Умеренный риск	Критический риск	Критический риск
Очень высокая вероятность	Низкий риск	Умеренный риск	Критический риск	Критический риск	Критический риск

Рис. 5.3. Пример матрицы рисков

При разработке подходов к управлению существующими рисками (например, при анализе мульти-рисков или сравнении различных участков территории) используются так называемые матрицы рисков, которые помогают приоритизировать мероприятия по уменьшению рисков. Матрицы строятся с использованием основных показателей концепции риска: вероятности и последствий. Пример матрицы рисков показан на рис.5.3.

В литературе, посвященной вопросам управления риском (риск-менеджмент), при определении стратегии обработки рисков, рекомендуется рассматривать следующие возможные направления: (1) избегание риска, (2) передача или разделение риска, (3) допущение или принятие риска, (4) снижение риска. Естественно, в каждом конкретном случае выбор наиболее подходящей стратегии должен определяться в зависимости от условий решаемой задачи.

В контексте задач сейсмического риска, в качестве стратегии избегания риска можно рассматривать отказ от строительства на территориях, неблагоприятных в сейсмическом отношении, что, однако, не всегда возможно. Стратегия передачи или разделения риска подразумевает страхование и/или перестрахование рисков с привлечением внешних фондовых рынков. Стратегия допущения или принятия риска означает, что существующий риск принимается осознанно, то есть либо уровень риска является приемлемым, либо в силу экономических или других обстоятельств он принимается «как есть» и не предпринимаются никакие действия по его снижению. Наконец, стратегия снижения риска означает проведение мероприятий, направленных на уменьшение риска.

Разработка и реализация программ управления риском должна осуществляться на основе количественного анализа таких ключевых факторов риска как опасность, подверженность и уязвимость, которые, как известно, являются основными источниками формирования риска.

Фактор сейсмической опасности существует как объективная реальность, которая не поддается управлению. При этом, однако, количественная оценка уровня опасности и сейсмическое районирование территорий должны являться неперенным компонентом программы управления риском на всех уровнях. Карты сейсмического районирования (ОСР, ДСР, СМР) должны регулярно обновляться на основе получения уточненных сеймотектонических, геофизических, геологических данных для

застраиваемых территорий и с применением усовершенствованных методов анализа. Все градостроительные и строительные решения (включая освоение территорий и выбор строительных площадок, благоприятных в сейсмическом отношении) должны приниматься на основе карт сейсмического районирования, что принципиально важно для снижения подверженности риску.

Что касается фактора сейсмической уязвимости, для его регулирования имеется гораздо больше возможностей. В частности, снижению уязвимости должно способствовать усовершенствование нормативных документов для проектирования и строительства сейсмостойких зданий, повышения контроля и надзора за качеством выполнения строительных работ, обследование существующей застройки, ее паспортизация, выявление и усиление уязвимых зданий и сооружений и, в конечном итоге, улучшение всей системы антисейсмических мероприятий.

5.3. Концепция приемлемого риска

Общество уже давно пришло к осознанию невозможности использования концепции абсолютной безопасности (нулевого риска) в реальных условиях. С одной стороны, риск может быть связан с неизбежным присутствием опасности, с другой стороны, его снижение может быть слишком дорогостоящим, а кроме того присутствие некоторого риска даже может быть выгодным. Понятно, что ресурсы любого общества ограничены, и затраты чрезмерных средств на повышение безопасности приведут к уменьшению финансирования важных экономических и социальных программ. Поэтому инженеры уже давно отказались от поиска решений с нулевым риском и в своих разработках стремятся к достижению такого уровня риска, который может считаться «приемлемым» или «допустимым».

Как показывает анализ литературных источников, вопросам оценки допустимого (приемлемого) риска при принятии решений в различных областях жизнедеятельности посвящено боль-

шое количество исследований и публикаций. Причем, в различных источниках можно найти различные формулировки понятия «приемлемый риск» или «допустимый риск». На наш взгляд, понятия допустимого и приемлемого риска можно, в принципе, считать синонимичными и в терминологическом смысле взаимозаменяемыми.

В дальнейшем изложении мы будем придерживаться следующего определения: приемлемый риск – это уровень риска, который общество готово принять в качестве допустимого (или неизбежного), учитывая объективно существующий уровень опасности, а также принимая во внимание особенности и социально-экономические возможности государства.

Определение уровня приемлемого риска требует, с одной стороны, научного обоснования и, с другой стороны, законодательного и нормативного регламентирования. Количественной мерой оценки и нормирования приемлемого риска может служить индивидуальный, коллективный или социальный риск.

В повседневной жизни люди обычно не задумываются о том, что каждый человек почти всегда подвергается определенному риску. Причем подверженность риску касается не только инженерно-технической деятельности, но и самых различных бытовых ситуаций. В некоторых ситуациях риск бывает неизбежным, в других ситуациях люди идут на него добровольно. Между тем, поскольку при решении инженерно-технических задач уровень оправданного риска не всегда возможно рационально обосновать, исследователи стараются использовать все имеющиеся оценки для сравнения рисков.

В работах (Ковалев, 1976, Воробьев, Ковалев, 1983) приведены обширные данные по риску гибели людей в различных условиях жизнедеятельности. В табл. 5.1 представлена классификация источников смерти, которая рассматривается в качестве основы для рассмотрения и сравнения оценок риска.

Классификация источников риска смерти

Источник риска	Основная причина смерти
Внутренняя среда организма	Генетические и соматические заболевания, старение
Естественная среда обитания	Несчастные случаи при землетрясениях, ураганах, наводнениях и т.д.
Искусственная среда обитания	Несчастные случаи в быту, на транспорте, заболеваемость от загрязнений внешней среды и т.д.
Профессиональная деятельность	Профессиональные заболевания, несчастные случаи при различных видах профессиональной деятельности
Непрофессиональная деятельность	Заболеваемость и несчастные случаи в любительском спорте и других видах непрофессиональной деятельности
Социальная среда	Самоубийства и самоповреждения, убийства и повреждения, причиненные с преступными целями, убийства и ранения, связанные с военными действиями и пр.

Для перечисленных в табл. 5.1 источников опасности авторы получили соответствующие оценки уровня риска гибели людей, которые представлены в табл. 5.2. За количественную меру риска принимается средняя вероятность гибели человека за единицу времени (год). Рассматривая отдельно естественную среду обитания, в табл.5.3 приведены ориентировочные оценки уровня риска смерти при различных видах стихийных бедствий.

Таблица 5.2

Источники и уровень риска в условиях жизнедеятельности

Источник риска	Уровень риска в год
Внутренняя среда организма	$10^{-4} - 10^{-2}$
Естественная среда обитания	$3 * 10^{-8} - 10^{-5}$
Искусственная среда обитания	$3 * 10^{-6} - 10^{-3}$
Профессиональная деятельность	$10^{-6} - 10^{-2}$
Непрофессиональная деятельность	$10^{-4} - 10^{-2}$
Социальная среда	$10^{-4} - 10^{-2}$

Таблица 5.3

Уровень риска смерти при стихийных бедствиях

Вид события	Уровень риска в год
Наводнения, цунами	$4 * 10^{-6}$
Землетрясения	$3 * 10^{-6}$
Тайфуны, циклоны, бури	$2 * 10^{-6}$
Грозы	$6 * 10^{-6}$
Ураганы, торнадо	$3 * 10^{-8}$
Все виды событий	$1 * 10^{-5}$

В монографии (Мушик, Мюллер, 1990), посвященной методам принятия технических решений, также рассматриваются и сравниваются различные виды рисков и результаты, полученные, в частности, американскими и немецкими специалистами. В таблице 5.4 представлены оценки вероятности летального исхода, связанного с различными источниками опасности, которые были получены в рамках исследования WASH-1400 (1975), NUREG (2016), посвященного проблемам безопасности ядерных реакторов.

Таблица 5.4

Вероятность летального исхода в различных ситуациях

Условия или вид деятельности	10^{-7} чел/год
Аварии автомашин	2700
Огонь и взрывы	400
Водоемы	280
Обращение с механизмами	100
Воздушное сообщение	75
Электричество	51
Молния	5,5
Общественный транспорт	0,45
Радиоактивное излучение	0,05

Представленные в этой таблице оценки вероятности гибели людей также выражаются в виде количества смертельных случа-

ев в год. Как можно видеть, эта единица измерения широко используется в различных исследованиях по данной тематике для выражения уровня индивидуального риска при авариях и/или стихийных бедствиях.

На основе анализа представленных выше данных, в работе (Мушик, Мюллер, 1990) делается вывод, что риск летального исхода существует на уровне 10^{-6} и выше на человека в год. Таким образом, при проектировании и эксплуатации технических устройств риск на уровне 10^{-7} чел/год может быть принят допустимым.

Отмечается, что принятую оценку допустимого риска нужно рассматривать как первый шаг к количественному сравнению. При необходимости, по мере накопления опыта, эта оценка может быть изменена. Исследования рекомендуют допустимый основной риск на уровне 10^{-5} чел/год. Эту величину можно воспринимать в качестве основы для относительной шкалы принимаемых решений.

При этом авторы отмечают нецелесообразность задания строго детерминированной границы риска. Более приемлемыми параметрами представляются вероятность, отделяющая оправданный летальный риск от условно оправданного риска (т. е. риска, соответствующего определенным условиям), а также вероятность, отделяющая условно оправданный риск от неоправданного. Для летального риска, в работе рекомендуется принимать значения оправданного риска равного 10^{-8} , и, с большим безопасным промежутком, неоправданного риска равного 10^{-5} на человека в год; значения эти выглядят разумными.

В рамках Программы подготовки по управлению стихийными бедствиями ПРООН (Disaster Management Programme UNDP) была подготовлена публикация (Coburn et al, 1994), посвященная вопросам оценки уязвимости и риска. В частности, в данной работе также представлены сравнительные оценки вероятности гибели людей от различных источников риска. Эти оценки приведены в нижеследующей таблице (Табл. 5.5).

Представленные оценки вероятности гибели людей, как можно видеть из таблицы, рассматривают очень широкий спектр

источников, относящихся как к естественной, так и искусственной среде обитания и жизнедеятельности человека. Заслуживает особого внимания сравнение оценок риска в различных регионах, что обусловлено, как надо понимать, не только различным уровнем опасностей, но и различным уровнем готовности общества к этим опасностям.

Кроме этого стоит отметить довольно высокий уровень добровольного риска, который готовы принимать на себя люди, например участники дорожного движения, а также курильщики, которые идут на несравнимо высокий уровень риска, выкуривая даже умеренное количество сигарет ежедневно.

Таблица 5.5

Вероятность гибели людей в год от различных причин

Выкуривание 10 сигарет в день	1 / 200
Смерть по естественным причинам в возрасте 40 лет	1 / 850
Любой вид насилия или отравление	1 / 3 300
Смерть от гриппа	1 / 5 000
Несчастные случаи на автодорогах (в Европе)	1 / 8 000
Лейкемия	1 / 12 500
Гибель от землетрясений (в Иране)	1 / 23 000
Игровые виды спорта	1 / 25 000
Несчастные случаи дома	1 / 26 000
Несчастные случаи на работе	1 / 43 500
Гибель от наводнений (в Бангладеш)	1 / 50 000
Смерть от облучения для работников радиационной промышленности	1 / 57 000
Убийство (в Европе)	1 / 100 000
Гибель от наводнений (в Северном Китае)	1 / 100 000
Несчастные случаи на железной дороге (в Европе)	1 / 500 000
Гибель от землетрясений (в Калифорнии)	1 / 2 000 000
Гибель от удара молнией	1 / 10 000 000
Гибель от урагана в Северной Европе	1 / 10 000 000

В более поздней публикации (Coburn & Spence, 2002) авторы приводят оценки сейсмического риска для застройки в Бостоне (США) на уровне от 0,2 до 80 на миллион жителей (в зданиях

без антисейсмических мероприятий) и в Калифорнии (в зданиях, запроектированных в соответствии с сейсмическими нормами) на уровне 50 на миллион человек. По оценкам авторов, в некоторых районах южной части Италии, ежегодный риск смерти для жителей существующих зданий из каменной кладки может варьироваться от 90 до 2000 на миллион человек, в зависимости от локальных оценок сейсмической опасности.

Следует отметить, что в ряде стран (например, в Нидерландах, Великобритании, США, Австралии, Новой Зеландии) уровень приемлемого риска регламентируется в нормативных документах. Впервые на государственном уровне методология управления риском, основанная на концепции приемлемого риска, была принята в Нидерландах, где в 1989 году был опубликован Национальный план по защите окружающей среды (The Dutch National Environmental Policy Plan) (Tellegen, 1989). По мере накопления знаний и получения новых данных этот план постоянно совершенствуется, уточняется и дополняется и, вплоть до настоящего времени, его положения служат основой для принятия решений в различных практических задачах.



Рис. 5.4. Разбивка диапазона индивидуального риска

Согласно разработанному подходу, весь возможный диапазон значений риска разбивается на три области, каждой из которых присваивается определенный цвет, используя известный «принцип светофора»: область высокого (неприемлемого) риска обозначается красным цветом, область приемлемого риска – желтым цветом и область малого (пренебрежимого) риска – зеленым цветом. На рис. 5.4 и 5.5 представлены диаграммы для индивидуального риска и для социального риска, которые используются уполномоченными органами Нидерландов в своей практической деятельности для оценки уровня приемлемости существующих рисков.

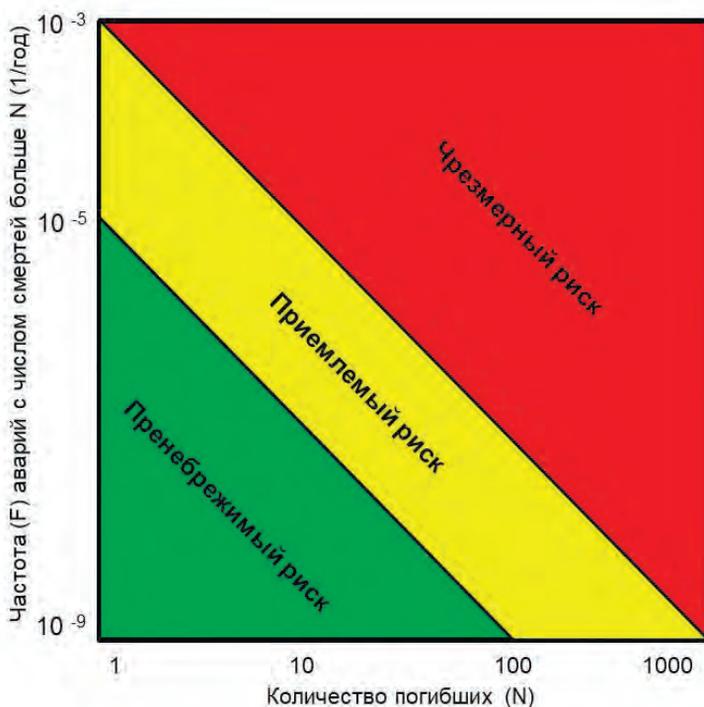


Рис. 5.5. Разбивка диапазона социального риска

В современной практике управления рисками широко известны принципы ALARA и ALARP (см. например, Кутюков и др. 2002, Bryant et al., 2018, Melchers, 2018, Nian, 2020). Критерий

ALARA («As Low As Reasonably Achievable») подразумевает уровень риска «настолько низкий, насколько разумно достижимо», а критерий ALARP («As Low As Reasonably Practicable») означает уровень «настолько низкий, насколько это практически обосновано». В настоящее время эти принципы используются специалистами разных стран при строительстве АЭС и других радиационно-опасных объектов, а также находят широкое применение и в других сферах жизнедеятельности, связанных с различными опасностями и рисками. Эти два принципа близки по своей сути и используются в качестве критериев рациональной оптимизации защитных мероприятий, исходя из условий ее достижимости в технико-технологическом и социально-экономическом смысле. Иллюстрация применения принципа ALARA/ALARP показана на рис.5.6.



Рис 5.6. Иллюстрация принципа ALARA (ALARP)

Границы диапазона приемлемого риска иногда обозначают, используя термины «De Minimis» (определяющий границу, ниже которой риск считается незначительным и может игнорировать-

ся при принятии решений) и «De Manifestis» (характеризующий ту границу риска, выше которой существующий риск должен жестко контролироваться и подлежит обязательному снижению).

Определение пределов допустимого риска – вопрос скорее политического компромисса, нежели научного анализа (Быков и др. 2004). В процессе выработки и принятия такого рода решений должны учитываться не только сравнительные оценки риска, но и социально-экономические условия каждой страны. Поэтому существующие подходы к определению критериев приемлемого риска и их численные значения в различных странах могут существенно различаться.

В работах Кузьмина и др. (1997), Быкова и др. (2004) анализируются и сравниваются количественные критерии риска, принятые или предлагаемые в практической деятельности различными национальными организациями в разных странах. Например, экспертная группа Королевского общества (Royal Society) в Великобритании в качестве приемлемого индивидуального риска рекомендует уровень $1 \cdot 10^{-6}$ чел/год, а уровень неприемлемого индивидуального риска $1 \cdot 10^{-3}$ чел/год. В интервале промежуточных значений рекомендуется применять принцип ALARP. Британское Управление по охране здоровья и безопасности (HSE) также считает приемлемым уровень индивидуального риска 10^{-6} чел/год. В то же время для диапазона значений риска от $0,3 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ на территориях проживания населения и активной коммерческой деятельности рекомендуется получение специальных оценок.

Положения вышеупомянутого Нидерландского плана по защите окружающей среды рассматривают значение $1 \cdot 10^{-6}$ в качестве максимально допустимого уровня риска, а значение $1 \cdot 10^{-8}$ в качестве пренебрежимого уровня индивидуального риска. В интервале промежуточных значений рекомендуется снижение уровня риска. Кроме оценок индивидуального риска в Нидерландах используются также оценки социального риска (двухмерный критерий, учитывающий как частоту, так и масштабы неблагоприятных последствий, см. Рис.5.5).

Максимально допустимый уровень социального риска принят равным 10^{-5} событий в год, превышающих 10 смертей на событие, 10^{-7} событий в год, превышающих 100 смертей на событие, а пренебрежимый уровень – 10^{-7} событий в год, превышающих 10 смертей на событие и 10^{-9} событий в год, превышающих 100 смертей на событие.

Министерство планирования (NSW) в Австралии для различных территорий рассматривают в качестве приемлемого уровень риска от $0,5 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ чел./год. Кроме этого в отдельных случаях используется критерий социального риска.

В работе (Рагозин, 2003) анализируются оценки существующего риска от опасных природных и техно-природных процессов на территории России, а также обосновывается необходимость использования концепции допустимого уровня природного риска в практике строительства и других видов деятельности (Рис. 5.7).

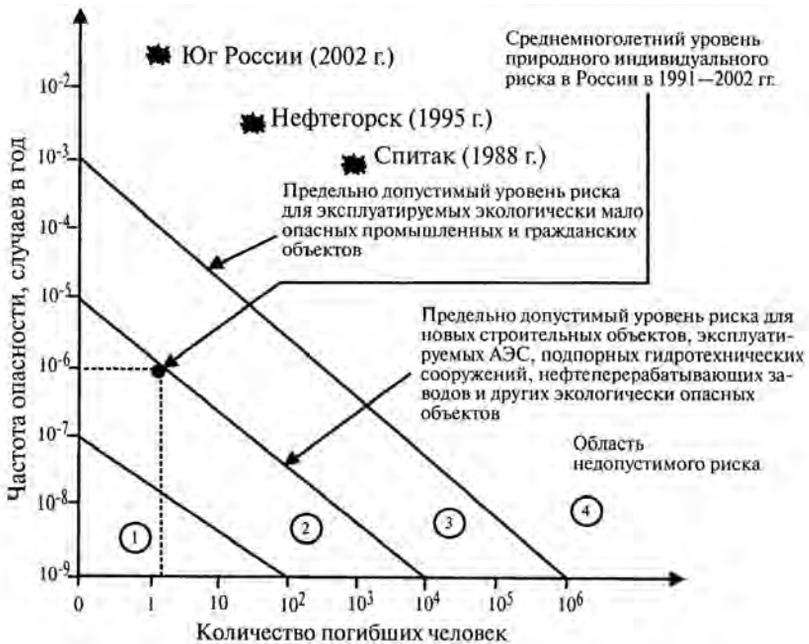


Рис. 5.7. Схема определения допустимых значений ежегодных социальных потерь населения (риска) от опасных природных и техно-природных процессов на территории России

В указанной работе предлагается поэтапное введение концепции приемлемого природного риска, начиная, на первом этапе, с установления допустимых значений в качестве нормативных (по субъектам Федерации и для страны в целом) на уровне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ чел/год, в зависимости от существующего уровня риска в пределах определенных территорий и технико-экономических возможностей. На следующем этапе, по мере уменьшения существующего риска, границы приемлемого риска могут быть уточнены.

Быков и др. (2004), с учетом экспертных оценок различных авторов, отмечают, что предельно допустимый уровень индивидуального риска для России, учитывая ее социально-экономический уровень развития, должен находиться в диапазоне от 10^{-4} до 10^{-5} в год. При этом целесообразным представляется применение различных критериальных уровней для существующих и для вновь строящихся объектов (Рис. 5.8).

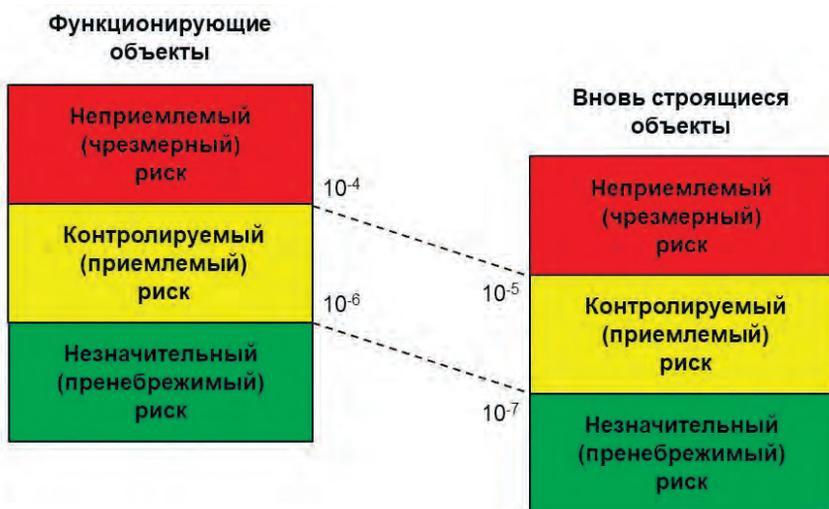


Рис.5.8. Рекомендуемые нормативные уровни индивидуального риска для функционирующих и вновь строящихся объектов на территории России (Быков и др., 2004)

Для новых объектов предельно допустимое значение индивидуального риска может быть установлено на уровне 10^{-5} в год.

Что касается функционирующих объектов, для них может быть принято менее жесткое требование 10^{-4} в год, однако при обязательном условии принятия мер по снижению существующего риска в течение определенного срока.

Кроме этого рассматриваются критерии социального риска и даются рекомендации по их использованию на территории России. Также как для индивидуального риска, в качестве критериев социального риска Быков и др. (2004) предлагают более «мягкие» нормативные требования по сравнению с критериальными уровнями, которые установлены и применяются в Нидерландах. Для максимально допустимого уровня социального риска предлагается величина 10^{-4} в год с максимальным числом погибших, равным 10, и, соответственно, величина 10^{-5} в год при количестве жертв равном 10 может быть принята в качестве пренебрежимого уровня социального риска. При этом на графиках социального риска (Рис. 5.7) рекомендуется оставить наклон кривых F-N таким же, который используется в Нидерландах.

На основе проведенного обзора литературных источников можно сделать ряд важных выводов, которые могут быть использованы для определения уровня приемлемого риска и для оптимизации мероприятий по снижению сейсмического риска:

- Принципиально важно понимать неизбежность природных рисков (в том числе сейсмического) и, следовательно, невозможность получения решений полностью свободных от риска.
- По итогам рассмотрения существующих подходов к проблеме приемлемого (допустимого) риска в различных регионах планеты можно отметить региональную неравномерность распределения риска смерти. Эта неравномерность присуща всем источникам риска, что связано не только с различным уровнем опасности, но и различными финансовыми и техническими возможностями для снижения уязвимости и обеспечения соответствующего уровня безопасности (которые могут существенно различаться в разных странах).
- В качестве критериев приемлемого риска могут рассматриваться оценки индивидуального риска (основанные на веро-

ятности смерти одного человека за определенное время, как правило, год), коллективного риска (рассматривающие суммарные оценки числа погибших) и социального риска (рассматривающие совместно частоту событий и масштабы неблагоприятных последствий).

- При определении границ диапазона приемлемого риска рекомендуется использовать принципы De Minimis (определяющий границу, ниже которой риск считается незначительным и может игнорироваться при принятии решений), De Manifestis (характеризующий уровень риска, который должен жестко контролироваться и подлежит обязательному снижению). В пределах между этими границами области риска рекомендуется использовать принцип ALARA/ALARP с учетом специфики решаемых задач.

- Если речь идет исключительно о риске материальных потерь, можно принимать решения, оценивая и оптимизируя лишь экономический эффект. При существующей угрозе человеческим жизням необходимо принимать во внимание критерии приемлемости риска.

5.4. Оптимизация антисейсмических мероприятий на основе анализа риска

Для обоснования целесообразности использования концепции риска при решении оптимизационных задач сейсмостойкого строительства необходимо принимать во внимание неизбежность присутствия риска во всех возможных технических решениях, связанных с проектированием сейсмостойких объектов. То есть смысл антисейсмических мероприятий вовсе не состоит в обеспечении целостности и невредимости всех сооружений. Учитывая огромный разрушительный потенциал, который могут нести землетрясения, это является практически недостижимой задачей и, говоря о сейсмозащите, в общем случае, речь может идти лишь об уменьшении ущерба при землетрясениях.

Поэтому возникает вопрос оптимизации уровня затрат на антисейсмическое усиление конструкций сооружений, из которого вытекает необходимость решения двух взаимосвязанных

и, в известной степени, противоречивых задач: с одной стороны, обеспечить сейсмическую надежность сооружения и снизить величину возможного ущерба, а, с другой стороны, ограничить стоимость антисейсмических мероприятий разумными пределами. Это возможно сделать, решая оптимизационную задачу антисейсмического проектирования на основе концепции риска.

В целом совокупный ущерб при землетрясении складывается из потерь, связанных с повреждающим и губительным воздействием землетрясения на инфраструктуру и население в зоне стихийного бедствия, а также сопутствующих затрат, являющихся следствием возникновения чрезвычайной ситуации и связанных с проведением оперативных аварийно-спасательных и других мероприятий.

Таким образом, при определении экономических потерь следует принимать во внимание: ущерб от повреждения строительных конструкций (за вычетом стоимости материалов, пригодных для повторного использования); ущерб от повреждения не подлежащих ремонту и восстановлению коммуникаций, оборудования, машин, механизмов и т.д.; ущерб от частично или полностью испорченных товаров, полуфабрикатов, сырьевых материалов; убытки от полной или частичной остановки производственно-технологического процесса и связанные с этим потери (сокращение объемов выпускаемой продукции, нарушение поставок, затопление складов и т.д.); ущерб от возможного возникновения взрывов, пожаров, затоплений, вызванных повреждением объектов при землетрясении (см., например, Айзенберг и др., 1978, Харитонов, Шолохов, 1989).

Кроме этого, при сильных и разрушительных землетрясениях возможны социально-экономические потери, связанные с неблагоприятным воздействием землетрясения на население и приобретающие самое различное проявление. Размеры сопутствующих затрат зависят от масштабов разрушений и складываются из расходов, связанных с проведением аварийно-спасательных работ, расчисткой завалов, оказанием медицинской и иной неотложной помощи населению, а также страховых и компенсационных выплат.

В общем случае, полный ущерб D как результат возможного повреждения отдельного здания или сооружения при единичном землетрясении можно представить состоящим из следующих компонентов:

$$D = D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + D6,$$

где:

$D1$ – ущерб от повреждения здания или сооружения;

$D2$ – ущерб от повреждения материальных ценностей, находившихся внутри объекта (инвентарь, оборудование, сырьевая и готовая продукция и др.);

$D3$ – ущерб от остановки технологического процесса и сокращения объемов выпускаемой продукции (перерывы в работе, остановка производства, прекращение поставок и др.);

$D4$ – ущерб от возможного вредного влияния последствий разрушения объекта на окружающую среду и другие объекты (возникновение пожаров, затоплений, выбросы вредных веществ и др.);

$D5$ – ущерб, связанный с травматизмом и гибелью людей.

$D6$ – сопутствующие затраты.

Величина $D1$, характеризующая ущерб, связанный с повреждением конструктивных элементов сооружения, по сути своей может являться стоимостным эквивалентом (выраженным в денежных единицах или в процентах от первоначальной стоимости объекта) степени повреждения сооружения, поскольку между ними существует определенная связь, а именно, с увеличением степени повреждения сооружения растет величина потерь, вызванных повреждением или разрушением строительных конструкций.

От степени повреждения сооружения зависит также и величина остальных компонентов полного ущерба. Однако, как показывает анализ последствий землетрясений, их величина будет отличаться от нуля, как правило, только при повреждениях здания или сооружения третьей степени или выше, что соответствует возникновению существенных структурных повреждений.

Очевидно, что, кроме зависимости от степени структурного повреждения здания или сооружения, величина каждого из компонентов возможного ущерба зависит также от некоторых своих собственных характеристик, определяемых, в частности, функциональным назначением данного здания.

Так, например, для жилых зданий или объектов социального и культурно-бытового назначения, величина потерь будет определяться, в основном, размерами компонентов $D1$, $D2$, $D5$, тогда как для производственных объектов существенный вклад в совокупный ущерб может внести компонент $D3$. Для таких объектов как ТЭЦ, ГЭС, хранилища горючих или взрывоопасных материалов, а также некоторых промышленных предприятий может быть особенно велика величина компонента $D4$, связанного с экологическими последствиями.

Следует особо подчеркнуть, что некоторые из компонентов полного ущерба связаны с потерями, которые по сути своей трудновыразимы в денежной форме. В частности, возможные разрушения или повреждения сооружений могут явиться причиной неопенимых потерь культурных ценностей ($D2$), губительных экологических последствий ($D4$), человеческих жертв или травм ($D5$). Не все из такого рода потерь поддаются экономическим оценкам и выражению убытков в стоимостном виде.

Очевидным примером неэкономических потерь при землетрясениях является гибель людей. В работе (Аугусти и др., 1988) приведены примеры исследований, авторы которых пытаются решать задачу оптимизации, включая цену человеческой жизни в общую целевую функцию, что приводит к абсурдным результатам.

С одной стороны, как показывает анализ, для того чтобы оптимальное экономическое решение было чувствительно к цене человеческой жизни ее нужно устанавливать настолько высокой, что сам по себе экономический анализ теряет смысл. С другой стороны, использование критерия полезности для проектирования, например, дома престарелых при таком подходе привело бы

к рассмотрению гибели людей как положительного явления, повышающего суммарный экономический эффект.

Учитывая вышесказанное, как будет показано ниже, предпочтительным является подход, при котором оценки экономического и неэкономического ущерба будут производиться раздельно.

При проектировании объектов в сейсмических районах следует учитывать, что каждому из вариантов проектных решений соответствует некоторый сейсмический риск, величина которого определяется как уровнем сейсмической опасности, так и особенностями самого сооружения, связанными с возможными экономическими и другими потерями. Сравнительный анализ степени риска и полезности, присущих различным возможным проектным вариантам, позволит выбрать оптимальный вариант решения (уровня антисейсмических мероприятий).

В случае, если все элементы возможного ущерба могут быть выражены в стоимостных эквивалентах, процесс оптимизации проектного решения подразумевает обеспечение оптимального соотношения начальных затрат, связанных с повышением сейсмостойкости объекта, и стоимости убытков от землетрясения.

На рис. 5.8 схематично показано соотношение между этими компонентами затрат в зависимости от уровня сейсмозащиты сооружения. Кривая, показанная синим цветом, показывает увеличение начальных затрат при повышении проектной сейсмостойкости сооружения, а зеленая кривая – уменьшение ущерба, достигаемое в результате предусмотренных в проекте антисейсмических мероприятий.

Суммируя начальные затраты на антисейсмические мероприятия и убытки, возникающие в результате повреждения сооружения, получим показанную красным цветом кривую, вогнутый характер которой показывает возможность поиска наиболее эффективного (оптимального) проектного решения.

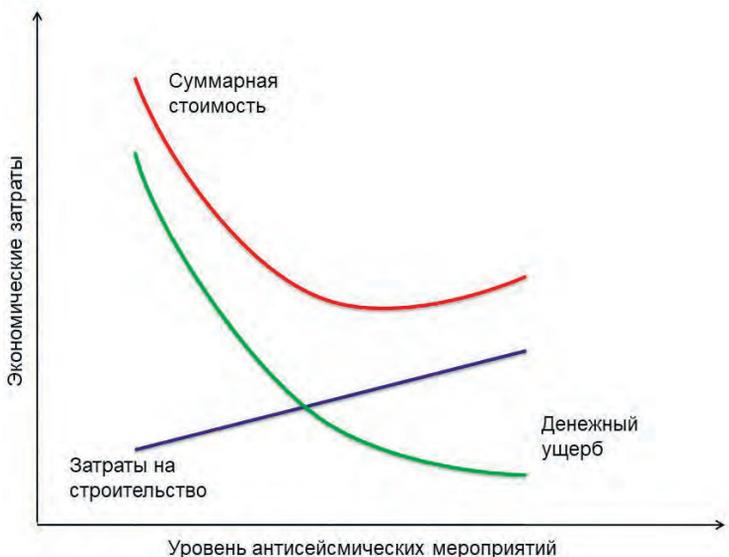


Рис. 5.8. Анализ экономической эффективности затрат на сейсмостойкое строительство

Оптимальный уровень антисейсмического усиления сооружения определяется на основе минимизации целевой функции:

$$C = C_0 + D \implies \min,$$

где:

C – величина полных затрат (суммарная стоимость);

C_0 – первоначальная стоимость строительства, включая затраты на антисейсмическое усиление;

D – суммарная величина денежных потерь, связанных с повреждением сооружения при землетрясениях.

Следует отметить, что первый член в вышеуказанном выражении целевой функции имеет детерминированный характер, то есть для каждого из рассматриваемых вариантов проектного решения его величина может быть заведомо определена в зависимости от принятого уровня сейсмозащиты. Второе слагаемое (величина вероятных потерь) отражает величину сейсмического риска, оценка которого может служить основой для выбора оптимального проектного решения.

Для каждого из рассматриваемых вариантов проектного решения величина суммарного экономического риска может быть определена суммированием риска по всем видам затрат, то есть, в соответствии с определением понятия риска, в виде суммы произведений величины каждого из возможных компонентов ущерба на вероятность его возникновения.

Таким образом, вышеприведенное выражение для целевой функции можно переписать в виде:

$$R = C_o + \sum A_k * P_k \implies \min,$$

где:

R – величина суммарного экономического риска, присущего рассматриваемому варианту решения;

C_o – суммарная величина начальных затрат на возведение сооружения, включая антисейсмические мероприятия по данному варианту решения;

A_k – величина k -го компонента возможного экономического ущерба в результате повреждения сооружения при землетрясении;

P_k – вероятность возникновения данного компонента ущерба.

Из рассмотрения целевой функции видно, что при равенстве второго слагаемого нулю (имея в виду невозникновение воздействий повреждающего уровня) сравнение вариантов будет производиться только по величине C_o и, естественно, что минимальной окажется величина затрат, соответствующих варианту строительства без антисейсмических мероприятий.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что в принятом толковании величина минимального экономического риска (нижняя граница) определяется величиной начальных затрат на строительство сооружения без антисейсмических мероприятий, причем знак равенства между ними может иметь место лишь в случае отсутствия повреждений.

Что касается диапазона изменения величины риска R , очевидно, что он зависит как от величины отдельных компонентов возможного ущерба, так и от вероятности их возникновения,

причем верхняя граница риска теоретически может быть определена суммированием начальных затрат и полных значений всех компонентов возможного ущерба.

Выбор оптимального варианта на основе лишь экономических критериев может применяться для объектов с чисто экономической ответственностью, повреждение которых не связано с возникновением неэкономического ущерба.

Можно предположить, что такой подход может применяться также для регионов с невысоким уровнем сейсмической опасности, где, вследствие достаточно низкой вероятности возникновения в рассматриваемых сооружениях тяжелых структурных повреждений, будет невелика, соответственно, и вероятность возникновения неэкономического ущерба.

Для объектов, повреждение которых связано с гибелью людей и (или) неблагоприятными экологическими последствиями, как отмечалось выше, наряду с оценками экономического риска следует оценивать также риск возникновения и такого рода «неэкономических» потерь.

Полученные оценки риска гибели людей или экологического риска могут вводить дополнительные ограничения в поиск оптимального решения, то есть служить в качестве критерия надежности. Как отмечалось в предыдущих разделах отчета, для этих целей могут использоваться установленные значения приемлемого риска.

В этом случае, схема анализа и принятия оптимального решения примет вид, показанный на рис.5.9.

Таким образом, в общем виде, оптимальным следует считать тот вариант решения, который, обеспечивает, минимизацию экономического риска, но при этом не противоречит условию надежности, то есть не превышает установленный уровень приемлемого (допустимого) риска для человеческих жизней.

Необходимо понимать, что в общем случае критерий приемлемого риска должен являться определяющим для окончательного выбора решения.

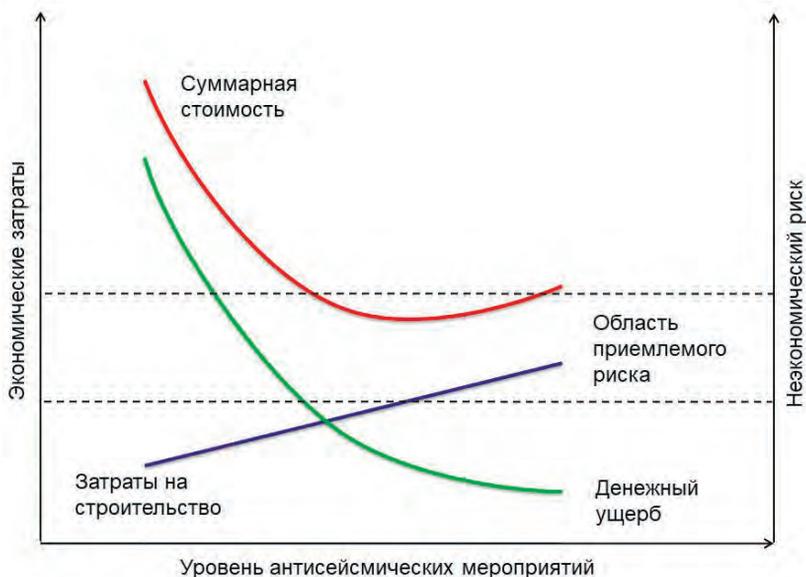


Рис. 5.9. Выбор решений на основе концепции приемлемого риска

Оценку сейсмического риска, связанного с человеческими жертвами, целесообразно выполнять в удельном выражении (то есть в терминах индивидуального риска – человеческая жизнь в единицу времени), что позволит проводить сравнение с установленным уровнем приемлемого (допустимого) риска. Вместе с тем оценки потерь могут быть получены и в абсолютном выражении (в терминах коллективного риска – общее количество погибших людей).

При использовании в качестве критериев оптимальности дополнительных условий (равенств или неравенств), отражающих требования к полезности или надежности функционирования объекта, для решения оптимизационной задачи может понадобиться привлечение методов математического программирования.

Кроме этого, для объектов, повреждение которых может быть связано с неблагоприятными выбросами и загрязнением окружающей среды, дополнительно следует производить оценку экологического риска. Этот компонент ущерба является весьма

специфическим и, возможно, реже встречающимся по сравнению с другими видами ущерба. Однако пренебрежение этими факторами риска может привести к катастрофическим и долгосрочным последствиям.

Поэтому для тех производств или хранилищ, которые так или иначе связаны с опасностью вредных выбросов, должны быть получены оценки возможного их влияния на окружающую среду (при различном уровне повреждения). На основе этих оценок для ситуаций, связанных с возникновением отказов в результате вероятного разрушительного землетрясения, можно будет оценить величину соответствующего компонента сейсмического риска. Во всяком случае, для таких объектов вопрос о значении возможного ущерба и уровне приемлемого экологического риска должен решаться в индивидуальном порядке.

Внедрение концепции приемлемого риска в практику сейсмостойкого строительства для оптимизации инженерных решений на основе изложенной методологии позволит повысить эффективность сейсмостойкого проектирования и строительства, обеспечивая при этом сейсмобезопасность населения.

5.5. Разработка плана действий на основе сценарного разрушительного землетрясения

В ходе Международной декады по уменьшению последствий природных катастроф (United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction, IDNDR) была разработана методология RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters, ISDR-RADIUS, 2000), которая нашла свое практическое применение в различных сейсмоопасных регионах Земли.

Концепция RADIUS предполагает широкое вовлечение в процесс управления риском различных городских структур, в том числе непосредственное участие в проекте городских властей.

Методология включает два важных этапа:

Первый этап – разработка сценария потенциального разрушительного землетрясения на территории города, включая оценку возможного ущерба и подробное описание последствий.

Второй этап – разработка программы управления риском и, в частности, подготовка конкретного плана действий, которые должны быть выполнены в городе непосредственно после окончания проекта и направлены на уменьшение сейсмического риска и подготовку к возможным будущим землетрясениям.

На первом этапе, для разработки сценария землетрясения, во-первых, необходимо оценить физический ущерб, нанесенный зданиям и инфраструктуре, и человеческие потери, а также последствия стихийного бедствия для функционирования и жизнедеятельности города.

В соответствии с данной методикой, сценарий землетрясения должен последовательно рассматривать различные стадии развития процесса сейсмической катастрофы, как во время, так и после землетрясения (спустя минуты, часы, недели, месяцы), принимая во внимание различные аспекты ущерба, который может быть нанесен городу и его населению. Человеческие потери оцениваются исходя из уровня конструктивных повреждений, причиненных зданиям и городской инфраструктуре сейсмическими воздействиями, вероятности вторичных эффектов, в том числе пожаров на территории города, эффективности работы спасательных служб.

Предполагается, что в разработке сценария должны участвовать научно-исследовательские, проектно-изыскательские и проектно-конструкторские организации города, а также городские службы, ответственные за подготовку к возможным чрезвычайным ситуациям.

Комплексные исследования и работы по разработке сценария должны охватывать следующие основные направления:

1. Оценка сейсмической опасности для территории города.
2. Оценка уязвимости и сейсмического риска для зданий и сооружений.

3. Оценка уязвимости и сейсмического риска для систем жизнеобеспечения.

4. Разработка сценария землетрясения и плана действий в условиях чрезвычайной ситуации.

Разработка сценария включает в себя выполнение следующих видов работ (при этом предполагается существование и использование соответствующей научно-технической базы, включая ранее разработанные методики и имеющиеся данные):

- оценка сейсмической опасности региона, анализ очаговых зон и выделение потенциально опасных очагов землетрясений, способных вызвать на территории города сильные и разрушительные сотрясения;

- локализация возможных очагов будущих землетрясений и определение вероятных параметров источников;

- выбор нескольких вариантов потенциальных землетрясений, представляющих наибольший практический интерес при разработке сценария с учетом, во-первых, наибольшей вероятности возникновения, а во-вторых, наибольшей разрушительной силы на территории города;

- оценка параметров затухания сейсмической энергии и интенсивности сейсмических колебаний с расстоянием и построение теоретических изосейст для выбранных вариантов потенциальных землетрясений;

- оценка интенсивности сейсмических сотрясений на территории города от рассмотренных вариантов потенциальных землетрясений и выбор сценарного землетрясения;

- анализ инженерно-геологических условий на территории города и оценка их возможного влияния на интенсивность сейсмических воздействий и сейсмический эффект;

- оценка и локализация на территории города участков с возможным проявлением сейсмогеологических эффектов, таких как разжижение, сейсмопросадка и др.;

- для выбранного сценарного землетрясения оценка возможного уровня интенсивности сейсмических сотрясений и распределение сейсмического эффекта по территории города;

- классификация и типизация зданий городской застройки;
- разработка функций повреждаемости и функций уязвимости для разных типов зданий;
- разработка функций потерь в зависимости от степени повреждения зданий;
- паспортизация городской застройки;
- классификация городских линий жизнеобеспечения (водопровод, канализация, газоснабжение, теплоснабжение, электро-снабжение);
- классификация транспортных сетей и объектов на территории города;
- оценка сейсмической уязвимости линий жизнеобеспечения и транспортных сетей;
- картирование линий жизнеобеспечения и транспортных сетей на территории города;
- создание базы данных и геоинформационной системы для города;
- оценка повреждаемости зданий и линий жизнеобеспечения на территории города в результате выбранного сценарного землетрясения;
- пространственный анализ и картирование физического ущерба для разных типов зданий на территории города;
- пространственный анализ и картирование физического ущерба для разных линий жизнеобеспечения на территории города;
- проведение интервью с представителями различных городских служб и сбор материалов для написания сценария воздействия разрушительного землетрясения на город;
- написание подробного сценария и разработка плана действий в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной гипотетическим сценарным землетрясением.

Первый вариант сценария гипотетического землетрясения, подготовленный с учетом всего вышеизложенного, рассылается в различные городские организации и службы для ознакомления и критического рассмотрения, после чего с учетом полученных

ответов, замечаний и предложений в первоначальный сценарий вносятся все необходимые исправления и дополнения.

Далее исправленный вариант сценария выносится на обсуждение на общегородском семинаре с участием представителей различных секторов городского сообщества, включая представителей органов власти, лиц, принимающих решения, технических специалистов, преподавателей ВУЗов и представителей ответственности. На семинар необходимо пригласить также представителей средств массовой информации, что должно способствовать широкому распространению полученных результатов и повышению осведомленности о реально существующей угрозе и уровне сейсмического риска на территории города.

Следующим этапом реализации методики RADIUS является разработка программы управления сейсмическим риском на основе подготовленного сценария землетрясения и дополнительных данных, полученных в ходе его обсуждения.

Особое внимание следует уделить разработке Плана действий, определяющего приоритеты и первоочередные мероприятия, которые должны быть выполнены непосредственно после завершения исследований, учитывая все уязвимые места в существующей системе сейсмобезопасности города, выявленные на первом этапе исследований.

Мероприятия, включенные в План действий и направленные на уменьшение риска и подготовку к возможным будущим землетрясениям, должны рассматривать и охватывать три этапа ожидаемого события:

- Перед землетрясением. Подготовительный период, длительность которого не определена и который, в процессе нормального функционирования общества, должен быть связан с подготовкой к будущему землетрясению.
- Непосредственно после землетрясения. Краткосрочный период (несколько недель или месяцев), связанный с ликвидацией чрезвычайной ситуации.
- После землетрясения. Восстановительный период (несколько лет), в течение которого выполняются восстановитель-

ные работы и ликвидация последствий землетрясения. В ходе этого периода постепенно начинается новый этап подготовки к будущему землетрясению.

При разработке программы необходимо исходить из того, что какое-либо одно агентство или даже правительство в целом не может управлять всеми аспектами риска. Землетрясения затрагивают всех и каждого в сообществе и поэтому все организации, все службы, все члены общества должны нести ответственность за готовность к возможным будущим землетрясениям и быть вовлечены в процесс управления риском.

Подготовленная программа управления риском, включая План действий, также как и сценарий землетрясения, выносятся на обсуждение на городском семинаре и должна стать достоянием общественности.

Вовлечение разных секторов общества, обмен опытом, обучение и широкое распространение полученных результатов является важной особенностью данной методологии, которая предназначена для повышения сейсмобезопасности города, обеспечения готовности всех его служб и населения к потенциальным будущим землетрясениям.

Вопросы для самоконтроля по пятой главе

1. Что такое цикл катастроф?
2. Какие методы управления риском вы знаете?
3. Что такое приемлемый (допустимый) риск?
4. Какие оценки приемлемого риска применяются в международной практике?
5. Что такое индивидуальный риск?
6. Что такое коллективный риск?
7. Что такое принцип ALARA/ALARP?
8. Какие виды ущерба могут возникать при землетрясениях?
9. В чем заключается подход к оптимизации антисейсмических мероприятий на основе концепции риска?
10. Что такое гипотетическое землетрясение?
11. Из каких этапов состоит разработка сценария землетрясения?
12. Что такое План действий, из каких компонентов он состоит?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проживая на территориях, подверженных сейсмической опасности, невозможно полностью избежать сейсмического риска. Землетрясения, как грозные природные явления, происходили в прошлом, и они будут происходить в будущем. Возникновение землетрясений связано с глубинными тектоническими процессами в недрах Земли и их предотвращение не подвластно человеческой воле. Поэтому при разработке и принятии технико-экономических решений, связанных с градостроительной политикой в сейсмоопасных районах, необходимо осознавать неизбежно существующий сейсмический риск, адекватно его оценивать и исходить из того, что в той или иной степени риск будет присутствовать во всех возможных решениях.

Одним из первоочередных этапов разработки программы повышения сейсмобезопасности городских территорий должны являться исследования по оценке сейсмического риска, с помощью и на основе результатов которых будут разрабатываться мероприятия по снижению риска.

Использование количественных оценок риска поможет оптимизировать градостроительные и строительные проектные решения в городском пространстве. Принятие тех или иных технико-экономических решений должно исходить из того, является ли существующий уровень риска допустимым (приемлемым) или необходимы специальные мероприятия по его снижению.

Как показывает анализ исследований в этой области, допустимый (приемлемый) риск не может регламентироваться неким единым, универсальным и общим уровнем для всех областей человеческой жизнедеятельности и для всех регионов планеты. Величина приемлемого риска неизбежно будет отражать специфические особенности каждого региона, каждой конкретной страны, территории отдельного города или строительного объекта. Поэтому эта величина должна рассматриваться в зависимости от совокупности всех факторов, определяющих как восприятие риска, так и влияющих на принятие решений по управлению риском.

Уровень допустимого (приемлемого) сейсмического риска, как для отдельных строительных объектов, так и для застроенных территорий, может (и должен) быть определен с учетом доступных финансовых возможностей по выполнению мероприятий, направленных на уменьшение существующего уровня. Установление уровня допустимого риска и принятие решения о приемлемости (или неприемлемости) существующего уровня риска является прерогативой соответствующих руководителей или органов управления.

Следует отметить, что концепция допустимого риска в неявном виде уже заложена в национальных строительных нормах, где декларируется: «Целью проектирования сейсмостойких зданий и сооружений является недопущение структурных разрушений, могущих привести к человеческим жертвам и экологическим катастрофам. При этом допускаются отдельные повреждения строительных конструкций, которые не препятствуют эвакуации людей и не приводят к порче ценного оборудования».

Таким образом, введение численных значений приемлемого риска не противоречит существующей строительной и градостроительной политике и в то же время дает возможность количественно уточнить границы риска для застроенных и населенных территорий и тем самым на количественной основе оптимизировать программу управления сейсмическим риском.

В процессе выработки решений для оптимизации системы антисейсмических мероприятий рекомендуется использовать сочетание критериев, включая «критерий оптимальности», основанный на анализе экономических оценок потенциального ущерба, и «критерий надежности/безопасности», основанный на рассмотрении и учете приемлемого уровня риска гибели людей и экологического риска. При этом критерий надежности, обеспечивающий непревышение установленного уровня допустимого риска, может быть использован в качестве основной характеристики сейсμβезопасности застроенных территорий и отдельных строительных объектов.

ИНСТРУКЦИЯ: КАК ОБЕЗОПАСИТЬ СЕБЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

Риск-менеджмент или управление риском (не только сейсмическим, но и любым другим) может и должно выполняться не только на уровне страны, города, района или отдельного предприятия, но и на уровне каждой семьи, каждого индивидуума.

Каждый живущий в сейсмоопасном районе должен адекватно осознавать существующую сейсмическую угрозу и соответственно подготовиться к будущим землетрясениям, не ожидая пока они произойдут.

Если вы заранее продумаете свои действия в случае возможного землетрясения в различных ситуациях, где оно может вас застать, у вас будет значительно больше шансов сохранить спокойствие и способность к разумным действиям в условиях, когда землетрясение станет реальностью. При этом рекомендуется рассмотреть все возможные ситуации – дома, на работе, на улице, в магазине, в общественном или личном транспорте или других местах, где вы проводите свое время.

Чем лучше вы подготовитесь и чем тщательнее продумаете свою программу подготовки (план действий), тем больше будет у вас шансов обезопасить себя, своих близких и свое имущество.

Любая программа управления сейсмическим риском должна включать в себя рассмотрение трех этапов, а именно (1) до землетрясения, (2) во время землетрясения и (3) после землетрясения. Ниже рассматривается каждый из них.

До землетрясения.

Проживая постоянно (или даже находясь временно) на сейсмоопасных территориях рекомендуется разузнать уровень сейсмической опасности данной местности.

Рекомендуется (хотя бы приближенно) оценить тип и сейсмостойкость здания, в котором вы проживаете. Среди объектов жилищно-гражданского строительного фонда к наиболее сейсмостойким относятся крупнопанельные, объемно-блочные и монолитные железобетонные типы зданий, тогда как наименее

сейсмостойкими являются здания с глинобитными, каменными и кирпичными стенами, выполненные без антисейсмических мероприятий.

Если ваше здание не является сейсмостойким, пригласите специалистов, чтобы проверить его состояние и при необходимости выполнить меры по укреплению его конструкций.

Заранее определите наиболее безопасные места во всех помещениях. В зданиях с несущими кирпичными (каменными) стенами это могут быть внутренние углы у капитальных стен, дверные проемы. В каркасных зданиях это могут быть места возле колонн. Кроме этого, в качестве убежища от падающих предметов может служить пространство под прочными столами, под кроватями.

Научите быстро находить и занимать безопасные места всех членов вашей семьи, особенно детей, с которыми рекомендуется провести тренировочные занятия.

Заранее определите наиболее безопасные пути эвакуации и проследите, чтобы они не перекрывались ни днем, ни ночью. Помните, что землетрясение может произойти в самое неожиданное время.

Закрепите (прикрепите к стенам) тяжелые и малоустойчивые предметы мебели, которые могут опрокинуться при сейсмических колебаниях. Проверьте надежность крепления подвешенных элементов интерьера (таких как люстры, полки, картины, зеркала и т.п.)

Проследите, чтобы все спальные места располагались на безопасном расстоянии от больших окон, зеркал и других предметов, которые могут упасть и поранить людей.

Подготовьте медицинскую аптечку со всей необходимой комплектацией, включая медикаменты, перевязочные материалы и вспомогательные средства. Если вы постоянно принимаете какие-либо лекарства, подготовьте необходимый запас. Держите аптечку в доступном месте, периодически проверяя срок годности медикаментов и их целостность.

Овладейте практическими приемами оказания первой помощи и научите этому ваших близких.

Во время землетрясения

Если вы получили сигнал о землетрясении или почувствовали сотрясения грунта или здания, в котором вы находитесь, сохраняйте спокойствие и самообладание. При этом, однако, реагируйте немедленно, учитывая всю ту подготовку, которую вы провели до землетрясения и нижеследующие инструкции.

Не поддавайтесь панике. Не стоит суетиться и бегать во время землетрясения, когда вокруг бьются стекла, о которые можно пораниться, падают предметы, о которые легко споткнуться и потерять равновесие при сейсмических толчках.

Быстро и трезво оцените ситуацию с учетом особенностей здания, в котором вы находитесь.

Находясь в помещении и не имея возможности быстро его покинуть, постарайтесь сразу же переместиться в заранее определенное безопасное место. Пригнитесь, прикройте голову руками и переждите толчки, длительность которых в большинстве случаев не превышает одной минуты и наибольшая опасность в это время исходит от падающих предметов.

Старайтесь держаться подальше от тяжелых и неустойчивых предметов (мебели, оборудования), которые могут сдвинуться с места или опрокинуться.

Если здание, в котором вы находитесь не сейсмостойкое (такие здания, как правило, не превышают 1–2 этажей), постарайтесь немедленно покинуть его. Выходите из здания как можно быстрее и сразу отходите на безопасное расстояние, остерегаясь падающих предметов и обломков.

В том случае, если вы находитесь на верхних этажах многоэтажного здания, большинство из которых являются сейсмостойкими, не стремитесь немедленно выйти на улицу. Помните, что лестничные площадки и марши являются очень уязвимыми конструктивными элементами зданий и часто обрушиваются при землетрясениях.

Во время землетрясения ни в коем случае не пользуйтесь лифтом. Если прекратится подача электроэнергии, вы сразу окажетесь заблокированными.

Не прыгайте в окна, если нет крайней угрозы вашей жизни. Это может привести к серьезной травме или даже смерти, в то время как здание может выдержать землетрясение без разрушения.

Если землетрясение застало вас на улице, стремитесь оставаться в стороне от зданий и других сооружений, которые могут разрушиться. Постарайтесь выйти на открытое пространство, где можно безопасно переждать подземные толчки.

Если вы находитесь в автомобиле, постарайтесь сразу же остановиться, выбрав безопасное место подальше от высоких зданий, мостов, путепроводов, эстакад, линий электропередачи. Поставьте машину на стояночный тормоз, не выходите наружу.

После землетрясения.

Действуйте в соответствии с силой проявившегося землетрясения и состоянием здания, в котором вы находитесь.

Сохраняйте спокойствие и внимательно оцените обстановку.

Если уровень сотрясений был небольшим, и вы уверены в сейсмостойкости здания, выходить из него не обязательно. Однако помните, что очень часто землетрясения сопровождаются повторными толчками. Будьте готовы к их возобновлению.

Осмотрите и проверьте, не чувствуется ли запах газа, нет ли повреждённых линий электропередач, разлитых легковоспламеняющихся жидкостей, не возникла ли угроза пожара.

В случае возникновения небольшого возгорания, немедленно погасите его. Если вы не в состоянии этого сделать самостоятельно, зовите на помощь, вызывайте пожарную команду.

Если в результате землетрясения есть пострадавшие и раненые, окажите им первую медицинскую помощь или вызовите службу спасения.

Внимательно осмотрите состояние вашего здания на предмет возможного повреждения несущих конструкций. Если в конструкциях возникли серьезные повреждения, постарайтесь покинуть здание.

Не входите в поврежденные здания, так как в любой момент может произойти обрушение отдельных элементов или всего здания.

Если произошло обрушение конструкций и вы оказались под завалом, спокойно оцените обстановку. Если необходимо, окажите первую помощь себе и тем пострадавшим, кто оказался рядом с вами. Постарайтесь (голосом или стуком) установить связь с людьми, находящимися вне завала.

Если вы обнаружите, что под завалом оказались другие люди, постарайтесь установить с ними двустороннюю связь. Окажите им посильную помощь и поддержку, в том числе психологическую. Свяжитесь со службами спасения.

Пользуйтесь мобильным телефоном только для коротких звонков или для экстренных вызовов. Для связи с вашими друзьями и близкими используйте текстовые сообщения. Помните, что перегруженные телефонные линии затруднят работу спасательных служб.

Для получения актуальной информации о чрезвычайной ситуации слушайте местные станции радио- или телевидения.

Доверяйте только информации, полученной по официальным каналам. Не верьте всевозможным слухам, не поддавайтесь панике.

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

Акселерограмма (**Accelerogram**) – результат записи сейсмических колебаний в терминах ускорений.

Активный разлом (**Active fault**) – разлом, по которому в историческое время (последние 10 тысяч лет) происходило смещение пород или возникали очаги землетрясений.

Амплитуда волны (**Wave amplitude**) – максимальная высота гребня или глубина впадины волны.

Асейсмичный район (**Aseismic area**) – район (территория), в котором почти не бывает землетрясений.

Астеносфера (**Asthenosphere**) – слой в верхней мантии Земли, подстилающий литосферу и характеризующийся пластическими свойствами, низкими скоростями и значительным затуханием сейсмических волн.

Афтершок (**Aftershock**) – слабые сейсмические толчки, возникающие в ограниченном объёме земной коры после основного землетрясения.

ВАСО (Вероятностный анализ сейсмической опасности) (**Probabilistic Seismic Hazard Analysis, PSHA**) – анализ сейсмической опасности территории на основе методов теории вероятности, включая оценку повторяемости сейсмических воздействий.

Велосиграмма (**Velocigram**) – результат записи сейсмических колебаний в терминах скоростей.

Взброс (**Reverse fault**) – разновидность геологического разрыва со смещением по падению (по восстанию), при котором горные породы, залегающие над плоскостью разрыва, двигались вверх относительно подстилающих пород. При пологом наклоне плоскости разрыва его называют надвигом. Взбросы и надвиги характерны для условий тектонического сжатия.

Волны Лява (**Love-waves**) – сейсмические поверхностные волны, при распространении которых происходит горизонтальное смещение частиц среды из стороны в сторону перпендикулярно направлению движения волны.

Волны Рэлея (**Rayleigh-waves**) – сейсмические поверхностные волны, при распространении которых частицы среды совершают колебания в вертикальной плоскости, ориентированной по направлению движения волны.

Гипоцентр землетрясения (**Earthquake hypocentre**) – условный центр очага землетрясения, в котором начинается разрыв горных пород.

ДАСО (Детерминистический анализ сейсмической опасности (**Deterministic Seismic Hazard Analysis, DSHA**)) – анализ сейсмической опасности территории на основе детерминистически заданных параметров очагов землетрясений. Предназначен, как правило, для оценки максимально возможных эффектов землетрясений.

Длина волны (**Wave length**) – расстояние между соседними гребнями или впадинами волны.

Длительность сильных колебаний (**Strong motion duration**) – интервал времени между первым и последним пиками сильных колебаний грунта, имеющими амплитуду выше определенного значения. На практике часто используется промежуток времени, в течение которого уровень колебаний превышает $A_{\max} / 2$.

Землетрясение (**Earthquake**) – природное явление, возникающее в недрах Земли и вызывающее сотрясения на ее поверхности.

Земная кора (**Earth crust**) – самая верхняя оболочка Земли, состоящая из континентальной (под континентами) и океанической (под океанами) коры.

Изосейсты (**Isoseists**) – линии, соединяющие точки с одинаковой интенсивностью землетрясения и разделяющие области с различным уровнем интенсивности.

Имитационное моделирование (**Simulation Design**) – применяется при неполной проектной документации для исследуемого здания (или при ее отсутствии) и представляет собой процесс моделирования, имитирующий использование нормативной документации и общих правил конструирования, соответствующих времени строительства исследуемого строительного объекта.

Индивидуальный риск (**Individual Risk**) – вероятность преждевременной гибели (или травматизма) людей от различных

причин в определенных условиях за определенный период времени. Этот показатель вероятных потерь, обычно измеряемый в количестве смертельных случаев за год, может использоваться для сравнительной характеристики различных видов жизнедеятельности, сопряженных с той или иной степенью опасности или различных условий обитания людей.

Карты сейсмической опасности (**Seismic Hazard Maps**) – графическое представление пространственного распределения вероятного уровня сейсмической опасности на определенной территории для различных периодов повторяемости. В зависимости от масштаба и детальности исследований составляются карты общего сейсмического районирования (ОСР), детального сейсмического районирования (ДСР), сейсмического микрорайонирования (СМР).

Классификация уязвимости (**Vulnerability Classification EMS-98**) – в рамках Европейской макросейсмической шкалы определено шесть классов сейсмической уязвимости (А, В, С, D, Е, F) в зависимости от материала несущих конструкций и конструктивной схемы зданий. Помимо этих основных характеристик, классификация уязвимости учитывает комплекс дополнительных факторов (например, архитектурно-конструктивные особенности здания, качество проектирования и строительства, расположение здания и его актуальное состояние), которые могут также влиять на сейсмическую уязвимость.

Коллективный риск (**Collective Risk**) – интегральная количественная оценка вероятной гибели (или травматизма) людей в определенных условиях на определённой территории за определенный период времени. В отличие от индивидуального риска, который по своей сути является частотной характеристикой смертельных исходов от различных видов опасностей, коллективный риск может служить характеристикой масштаба человеческих потерь в случае реализации отдельных опасных сценариев.

Композиционная модель уязвимости застройки (**Vulnerability Composition Model**) – определяется составом застройки, выраженным в типах зданий и классах сейсмической уязвимости

EMS-98. Композиционная модель застройки строится для каждой расчетной ячейки и представляет собой процентное содержание классов сейсмической уязвимости.

Косвенный ущерб (**Indirect Damage**) – вред (убыток), являющийся следствием прямого ущерба, вызванного сильным землетрясением. Может включать в себя как экономические потери, вызванные, например, нарушением функционирования объектов инфраструктуры, остановкой производства и разрывом хозяйственно-экономических связей, так и социальные потери, связанные, например, с возникновением дефицита рождаемости, психологическими аспектами воздействия катастрофы, а также политический, экологический и другие виды ущерба, включая так называемый «эффект ряби».

Литосфера (**Lithosphere**) – твердый внешний слой Земли, состоящий из земной коры и верхней части мантии и расположенный над астеносферой.

Литосферные / тектонические плиты (**Tectonic / lithospheric plates**) – тектонически обособленные крупные сегменты литосферы, перемещающиеся относительно других плит над более глубокими слоями оболочки Земли. Плиты сходятся в зонах сближения (конвергенции) и отходят одна от другой в зонах расхождения (дивергенции).

Магнитуда землетрясения (**Earthquake magnitude**) – мера величины землетрясения, являющаяся энергетической характеристикой источника (очага) землетрясения и позволяющая сравнивать между собой и классифицировать различные сейсмические события. Значения магнитуд вычисляются по результатам измерения колебаний, зарегистрированных сейсмическими станциями.

Максимально возможные потери (**Probable Maximum Loss, PML**) – показатель максимально возможных потерь с низкой вероятностью возникновения за определенный период времени.

Максимальное расчетное землетрясение (**Maximum Design Earthquake**) – землетрясение, определяющее уровень максимальной интенсивности на рассматриваемой площадке (территории) с вероятностью возникновения 0,02 (2%) в течение срока

службы здания или сооружения (со средним периодом повторяемости 2500 лет). Для особо ответственных объектов могут рассматриваться более редкие события (со средним периодом повторяемости 10000 лет).

Мантия Земли (**Earth's mantle**) – наибольшая по объему часть земных недр, расположенная между корой и ядром на глубинах от 40 до 2900 км. Состоит из верхней мантии (мощность слоя которой достигает 1000 км) и нижней мантии (мощностью до 2000 км).

Микросейсм (**Microseisms**) – колебания земной поверхности малой амплитуды, образующие сейсмический фон или «шум». Вызываются природными причинами или деятельностью людей.

Модальный анализ (**Modal Analysis**) – расчетно-теоретическое определение собственных динамических характеристик сооружения (в частности, частоты/периода собственных колебаний и формы колебаний).

Неопределенность (**Uncertainty**) – является атрибутивным источником и компонентом риска. Она складывается из алеаторной неопределенности (**Aleatory Uncertainty**), которая отражает стохастическую (случайную) природу изучаемых процессов и явлений, а также эпистемической неопределенности (**Epistemic Uncertainty**), которая связана с отсутствием достаточных знаний об этих процессах и заменой отсутствующих знаний некоторыми моделями, основанными на неполной информации. Первая (алеаторная) неопределенность не может быть исключена, вторая (эпистемическая) неопределенность может быть уменьшена (или даже исключена) в результате приобретения достаточных знаний об изучаемом процессе.

Объемные сейсмические волны (**Body waves**) – волны, возникающие в очаге землетрясения и несущие энергию колебаний к земной поверхности. Выделяют два типа объемных волн: продольные и поперечные.

Операционный модальный анализ (ОМА) (**Operational Modal Analysis, OMA**) – экспериментальное определение соб-

ственных динамических характеристик сооружения с помощью натуральных измерений в нормальных (операционных) условиях эксплуатации, когда возбуждение конструкции вызывается только фоновыми (микросейсмическими) колебаниями. То есть, при ОМА оценка динамических характеристик сооружения определяется на основе анализа только выходного сигнала (при неизвестном входном сигнале).

Оценка риска (**Risk Assessment**) – процесс моделирования и количественного расчета вероятного ущерба (потерь). В соответствии с определением риска включает в себя идентификацию и количественное прогнозирование опасности, оценку уязвимости системы и ее элементов по отношению к этому виду опасности, а также комплексную оценку ценностей, подвергаемых риску. Результатом оценки риска являются прогнозные оценки потерь, выраженные в физических, стоимостных или иных показателях. Имея в виду значительный уровень неопределенностей, связанных с развитием комплексных процессов, которые могут быть затронуты воздействием стихийного бедствия, оценка риска, как правило, ограничивается анализом прямого ущерба.

Первое вступление (**First arrival**) – смещение записи на сейсмограмме в момент прихода продольной волны. Смещение вверх соответствует сжатию в очаге, смещение вниз – растяжению.

Плейстосейстовая зона (**Meizoseismal area**) – область наиболее сильных колебаний и значительных разрушений при землетрясении (в пределах первой изосейсты).

Поверхностные сейсмические волны (**Surface seismic waves**) – сейсмические волны, образующиеся в результате сложного взаимодействия объемных волн с поверхностью Земли и распространяющиеся только по ее поверхности; их скорости меньше скорости объемных волн. Выделяют два наиболее важных типа поверхностных волн: волны Лява и волны Рэлея.

Подверженность (**Exposure**) – совокупность ценностей (элементов риска), находящихся под воздействием опасности.

Поперечные волны или S-волны (**S-waves**) – поперечные или «вторичные» сейсмические волны, в которых колебания проис-

ходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Названы вторичными, потому что они распространяются медленнее, чем «первичные» Р-волны. Создают в среде распространения сдвиговые напряжения.

Преломление волн (**Wave refraction**) – отклонение проходящей волны от направления ее первоначального распространения при пересечении границы сред, различающихся по скорости распространения волн.

Приемлемый риск (**Acceptable Risk**) – уровень риска, который общество готово принять в качестве допустимого (или неизбежного), учитывая объективно существующий уровень опасности, а также принимая во внимание особенности и социально-экономические возможности государства. Количественной мерой оценки может служить индивидуальный или коллективный риск. Определение уровня приемлемого риска требует, с одной стороны, научного обоснования и, с другой стороны, законодательного и нормативного регламентирования.

Прогноз землетрясения (**Earthquake prediction**) – предсказание времени, места и магнитуды землетрясения.

Продольные или Р-волны (**P-waves**) – продольные или «первичные» сейсмические волны, в которых колебания частиц среды ориентированы вдоль направления распространения фронта волны. Названы первичными потому, что распространяются с большой скоростью и первыми приходят в точку наблюдения. Создают в среде распространения напряжения сжатия и растяжения.

Проектное (расчетное) землетрясение (**Design Earthquake**) – землетрясение, определяющее уровень максимальной интенсивности на рассматриваемой площадке (территории) с вероятностью возникновения 0,1 (10%) в течение срока службы здания или сооружения (со средним периодом повторяемости 500 лет).

Прямой ущерб (**Direct Damage**) – вред (убыток), нанесенный рассматриваемому объекту (или объектам, расположенным на рассматриваемой территории) непосредственно в результате землетрясения (сейсмических воздействий). Может включать в

себя как экономические потери, вызванные (полным или частичным) повреждением зданий и сооружений, оборудования, имущества и других материальных ценностей, так и социальные потери (погибшие, раненые).

Раздел Мохоровичича (**Moho boundary**) – граница между земной корой и мантией, выраженная скачкообразным возрастанием скоростей сейсмических волн. Глубина границы Мохоровичича увеличивается в континентальных частях и уменьшается в океанических частях Земли.

Разжижение (**Liquefaction**) – процесс, вследствие которого грунт ведет себя не как твердое тело, а как плотная жидкость. Может возникать в водонасыщенных песчаных грунтах при сейсмических воздействиях, приводя к значительным деформациям оснований зданий и сооружений.

Рой землетрясений (**Earthquake swarm**) – последовательность землетрясений, происходящих в одном и том же районе в относительно короткий период времени, когда ни одно из землетрясений не выделяется среди других по величине.

Сброс (**Normal fault**) – сбросом называется разновидность тектонического нарушения со смещением по падению, когда горные породы, залегающие над плоскостью разрыва, двигаются по этой плоскости вниз. Сбросы образуются в условиях тектонического растяжения.

Сейсмическая интенсивность (**Seismic Intensity**) – локальная характеристика уровня сейсмической опасности (сейсмических воздействий). В отличие от количественных параметров сейсмических колебаний (амплитуды, частоты, длительности), сейсмическая интенсивность основана на описании макросейсмических эффектов (в том числе ощущения людей и поведение бытовых предметов, поведение зданий и сооружений, явления в окружающей природной среде), наблюдаемых при землетрясениях. Измеряется в целочисленных баллах шкалы макросейсмической интенсивности.

Сейсмическая опасность (**Seismic Hazard**) – характеристика территории, связанная с вероятными сотрясениями поверхности

грунта и другими сопутствующими эффектами, вызываемыми землетрясениями и представляющими угрозу для населения и объектов, расположенных на этой территории. Вероятностная оценка сейсмической опасности показывает, какой уровень опасности (сейсмических воздействий) будет превышен (или не превышен) на определенной территории в определенный период времени. Уровень сейсмической опасности может выражаться интенсивностью сотрясений или в терминах параметров колебаний. В Туркменистане для количественного описания уровня сейсмической опасности, в соответствии с национальными нормами сейсмостойкого строительства, используется сейсмическая интенсивность в баллах MSK-64.

Сейсмическая уязвимость (**Seismic Vulnerability**) – характеристика зданий и сооружений (противоположная понятию «сейсмостойкость»), отражающая их подверженность повреждениям при сейсмических воздействиях. При одинаковом уровне сейсмической интенсивности более уязвимые сооружения получают большую степень повреждения (и наоборот).

Сейсмические волны (**Seismic waves**) – упругие волны, распространяющиеся в теле Земли и создаваемые очагом землетрясения, взрывом или другими источниками.

Сейсмический момент (**Seismic moment**) – величина, используемая сейсмологами для измерения величины землетрясения. Определяется как произведение модуля сдвига горных пород на площадь разрыва и амплитуду смещения.

Сейсмический риск (**Seismic Risk**) – количественная мера вероятного уровня потерь для рассматриваемого объекта или системы объектов на определенной территории за заданный временной интервал. Величина сейсмического риска определяется комбинацией сейсмической опасности на данной территории, сейсмической уязвимости объектов подверженных этой опасности и ценностей, которые могут быть частично или полностью повреждены или потеряны в результате потенциальных будущих землетрясений.

Сейсмическое микрорайонирование (**Seismic Microzonation**) – уточненная оценка пространственного распределения сейс-

мической опасности (расчетной сейсмичности) на территории объекта (населенного пункта) с учётом локальных грунтовых условий по данным дополнительных инженерно-геологических и инженерно-сейсмологических изысканий.

Сейсмическое районирование (**Seismic Zonation**) – картирование сейсмической опасности.

Сейсмичность (**Seismicity**) – распределение землетрясений во времени и в пространстве.

Сейсмограмма (**Seismogram**) – результат записи сейсмических колебаний в терминах смещений.

Сейсмограф (**Seismograph**) – инструмент для записи движений земной поверхности, вызываемых сейсмическими волнами как функции времени.

Сейсмология (**Seismology**) – наука, изучающая процессы и явления, связанные с землетрясениями и распространением сейсмических волн.

Сейши (**Seiches**) – колебания (стоячие волны) воды, возникающие в замкнутых или частично замкнутых водоемах (например, озерах или заливах) при сейсмических явлениях.

Спектр реакции (**Response Spectrum**) представляет собой огибающую кривую максимальных реакций (перемещений, скоростей, ускорений) системы осцилляторов, каждый из которых характеризуется собственным периодом колебаний и некоторым затуханием, присущим реальным зданиям и сооружениям, на заданное сейсмическое воздействие. Используется для определения сейсмических нагрузок на сооружения.

Спектральное ускорение (**Spectral Acceleration**) – максимальное по модулю значение ускорения на определенных значениях частот (периодов) колебаний. Используется в качестве характеристики интенсивности сейсмического воздействия для зданий и сооружений.

Среднегодовые потери (**Annual Average Loss, AAL**) – ожидаемое значение потерь в среднем за год при рассмотрении длительного периода времени. Для целей сравнения оценки потерь могут быть также представлены в удельном выражении (**Annual**

Average Loss Ratio, AALR) по отношению к общей стоимости подверженных риску ценностей.

Средний удельный ущерб (Mean Damage Ratio, MDR) – показатель ущерба, выражаемый в процентах по отношению к общей стоимости ценностей, подверженных риску.

Степень повреждения (Damage Grade) – уровень конструктивных повреждений в сооружении. В зависимости от состояния (несущих и ненесущих) элементов строительных конструкций и всей конструктивной системы после землетрясения степень повреждения определяется в диапазоне от 0 (отсутствие повреждений) до 5 (полное разрушение).

Сценарий землетрясения (Earthquake Scenario) – прогнозная оценка развития чрезвычайной ситуации (включая оценку потенциального ущерба) на определенной территории в результате сценарного землетрясения. Может использоваться для оценки готовности города к реальным землетрясениям, в том числе для планирования необходимых ресурсов и отработки слаженности действий городских и специальных служб в условиях приближенных к реальным стихийным бедствиям. Разработка сценариев землетрясений является эффективным инструментом для лучшего понимания и расширения осведомленности о реальности сейсмической угрозы, для выявления существующих уязвимостей, а также подготовки плана действий по управлению риском.

Сценарное землетрясение (Scenario Earthquake) – сейсмическое событие, используемое в расчетах сейсмического риска и для моделирования чрезвычайной ситуации на исследуемой территории. Для задания параметров сценарных землетрясений (включая местоположение, глубину, механизм очага, а также магнитуду и/или интенсивность) могут использоваться реальные характеристики прошлых землетрясений или расчетные характеристики, определяемые с использованием вероятностных методов. В качестве сценарных могут использоваться как отдельные землетрясения, так и ансамбли сейсмических событий, в том числе соответствующих уровню так называемого проектного землетрясения (ПЗ) или максимального расчетного землетрясения (МРЗ).

Тектоника плит (**Plate tectonics**) – теория движения и взаимодействия литосферных плит, на основе которой объясняются сейсмическая и вулканическая деятельность, горообразование и другие геологические процессы.

Тектонические землетрясения (**Tectonic earthquakes**) – землетрясения, возникающие в результате движения и взаимодействия тектонических плит.

Теория упругой отдачи (**Elastic Rebound Theory**) – теория возникновения землетрясений, согласно которой в горных породах, окружающих сейсмогенный разлом, происходит медленное накопление энергии упругой деформации, тогда как крылья разлома остаются прижатыми друг к другу. В момент превышения предела прочности пород происходит резкое смещение по этому разлому с высвобождением накопленной энергии.

Тиксотропия (**Thixotropy**) – способность вещества разжижаться под внешним воздействием, а после прекращения воздействия снова затвердевать, восстанавливая свои механические связи. На основе явления тиксотропии объясняется возникновение эффектов разжижения грунтов при сейсмических воздействиях.

Управление риском (**Risk Management**) – комплекс мероприятий, охватывающих идентификацию, оценку, мониторинг и анализ риска (и всех составляющих факторов риска) с целью оптимизации управленческих решений, включая выбор наиболее эффективных методов и инструментария, и в конечном итоге направленных на уменьшение уровня риска (вероятности потерь).

Уровни знаний (**Knowledge Levels, KL**) – объем (полнота) расчетной информации (включая геометрические и конструктивные характеристики строительных конструкций и всего здания, а также свойства материалов конструкций), в зависимости от которого определяется соответствующий подход к оценке сейсмической уязвимости существующих зданий. Еврокод 8 определяет три уровня знаний: 1 – ограниченный уровень, 2 – нормальный уровень, 3 – полный уровень.

Форшок (**Foreshock**) – относительно слабые сейсмические толчки, очаги которых приурочены к ограниченному блоку земной коры, предшествующие более сильному землетрясению.

Ценности (**Assets**) – выраженная в физических, стоимостных или иных показателях характеристика объектов подверженных риску, совокупность которых определяет уровень максимально возможных потерь (ущерба).

Цунами (**Tsunami**) – особый класс волн, которые возникают в морях или океанах под воздействием подводных землетрясений. Цунами распространяются на большие расстояния от места своего возникновения и могут представлять очень серьезную опасность в прибрежных районах.

Экспериментальный модальный анализ, ЭМА (**Experimental Modal Analysis, EMA**) – экспериментальное определение собственных динамических характеристик сооружения с помощью натуральных измерений при заданном внешнем воздействии. При ЭМА оценка динамических характеристик сооружения определяется расчетным путем на основе анализа выходного сигнала при известном входном сигнале.

Элементы риска (**Elements at Risk**) – объекты, подверженные опасности. Характеризуются, с одной стороны, уязвимостью по отношению к рассматриваемой опасности, а с другой стороны, ценностью, которая может быть потеряна в результате проявления этой опасности.

Эпицентр землетрясения (**Earthquake epicentre**) – проекция центра очага (гипоцентра) землетрясения на земную поверхность.

Эффект ряби (**Ripple Effect**) – долговременные трансграничные последствия произошедшей катастрофы, распространяющиеся «как круги на воде» в пространстве и во времени, способные ощущаться долгие годы не только на непосредственно пострадавшей территории, но и далеко за ее пределами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абаканов Т., Оспанов А.К., Садыров Р.К., Баймбет С.М., Адильхан Б.Н., Турашова Ж.Е.* (2010): Комплексная методика оценки сейсмического риска сейсмоопасных территорий Казахстана // Сборник докладов 7-го Казахстанско-Китайского международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска Центральной Азии». 2 – 4 июня. – Алматы. 2010 г. – С. 454–464.
2. *Абасеев С.С.* и др. (2022): Отчет «О выполнении комплекса работ по оценке сейсмической опасности и инженерному обследованию зданий и результатах проведения необходимых для этого инженерно-геологических, геофизических и сейсмологических изысканий, обработки и анализа полученных данных согласно методологии построения карт сейсмического микрорайонирования г. Ашхабада», Фонды ИСФА, – Ашхабад, 2022. – 178 с.
3. *Абасеев С.С., Хыдыркулиева М.Б.* (2023): Новая методика сейсмического микрорайонирования Туркменистана (НМ СМРТ) по данным цифровой регистрации микросейсмического волнового поля на поверхности районируемой территории. Сборник докладов Международной научной конференции “Актуальные проблемы обеспечения сейсмической безопасности населения и территорий”, посвященной 80-летию Академии наук Республики Узбекистан, 2023, с.127–135.
4. *Абдуллабеков К.Н.* (1989): Электромагнитные явления в земной коре // ФАН, Ташкент, 1989. – 132 с.
5. *Айзенберг Я.М., Нейман А.И., Абакаров А.Д.* и др. (1978): Адаптивные системы сейсмической защиты сооружений. – М.: Наука, 1978. - 248 с.
6. *Акимов В.А., Соколов Ю.И., Сосунов И.В.* (2016): Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф. – М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 396 с.
7. *Александров А.А., Ларионов В.И., Суцев С.П., Фролова Н.И., Гумеров Р.А.* (2015): Методы анализа сейсмического риска для населения и урбанизированных территорий. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Естественные науки”. 2015. № 2.
8. *Аугусти Дж., Баратта А., Кашиати Ф.* (1988): Вероятностные методы в строительном проектировании. – М.: Стройиздат. - 1988. - 584 с.
9. *Аширов Т., Голинский Г.Л., Каррыев Б.С.* (1993): Внимание, сильное землетрясение! – Ашхабад, Ылым, 1993 – 28 с.
10. *Бержинская Л.П.* Сейсмический риск урбанизированных территорий : учеб. пособие. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2020. – 132 с.

11. *Богданова М.А., Ильясов И.Б., Рахманова М.* (2013): Оценка сейсмического риска для района г. Ашхабада. Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2013. № 6. С. 42-45.

12. *Будушев С.В., Джинчелашвили Г.А., Колесников А.В.* (2016): Нелинейный статический метод оценки сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. №5. С. 39–47.

13. *Быков А.А., Акимов В.А., Фалеев М.И.* (2004): Нормативно-экономические модели управления риском. Проблемы анализа риска. Том 1, №2, 2004. – С. 125-137.

14. *Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н.* (2008): Общая теория рисков. – 2-е изд., испр. – М. : Академия, 2008. – 368 с.

15. *Вознесенский Е.А.* (1998): Землетрясения и динамика грунтов. Соросовский образовательный журнал, N2, 1998. – С.101–108.

16. *Вознесенский Е.А.* (1999): Динамическая неустойчивость грунтов. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 261 с.

17. *Воробьев Е.И., Ковалев Е.Е.* (1983): Радиационная безопасность экипажей летательных аппаратов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.

18. *Воронина Е.В.* (2004): Механика очага землетрясения. Спецкурс. – М.: Физический факультет МГУ, 2004. – 92 с.

19. *Герасименко М.Д., Шестаков Н.В., Карабцова З.М.* (2008): Основы прогноза землетрясений. Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во Дальневост. Ун-та, 2008. – 64 с.

20. *Голинский Г.Л., Каллаур Т.Н., Непесов Р.Д., Лагуточкина К.Д.* Ашхабадское землетрясение 15 ноября 1968 года. /Сб. «Землетрясения в СССР за 1968 год». – Москва: изд-во «Наука», 1972. – С.50-58.

21. *Голинский Г.Л.* (1977): Уравнения макросейсмического поля землетрясений Туркмении // Изв. АН ТССР. - Сер. ФТХиГН. - 1977. - № 1. - С. 69–74.

22. *Голинский Г.Л.* (2000): Определение основных параметров сильных землетрясений для оценки сейсмической опасности территории Туркменистана: автореферат дис... кандидата физико-математических наук : 04.00.22.- Москва, 2000.- 28 с.

23. *Горшков Г. П.* (1949): Землетрясения на территории Советского Союза. – М.: Гос. изд-во геогр. лит., 1949. – 120 с.

24. *Горшков Г.П.* (1947): Землетрясения Туркмении. (Труды Сейсмологического института АН СССР; № 122). – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. – 63 с.

25. ГОСТ Р 51897-2002 (2002): Менеджмент риска. Термины и определения. – М.: Госстандарт России. – 12 с.
26. Доценко С.Ф., Кузин И.П., Левин Б.В., Соловьева О.Н. (2003): Возможные проявления цунами от сейсмических источников в Каспийском море // Физика Земли. 2003. № 4. С. 49–55.
27. Елохин А.Н. (2002): Анализ и управление риском: Теория и практика. – 2-е изд., испр. и доп. – М.:ООО ПолиМЕдиа, 2002. – 192 с.
28. Завьялов А.Д. (2006): Среднесрочный прогноз землетрясений. Основы, методика, реализация. – М.: Наука, 2006. – 256 с.
29. Завьялов А.Д. (2009): Основы геориска: землетрясения. ГеоРиск. – 2009. – № 3. – С. 20–27.
30. Захаров В.С., Смирнов В.Б. (2016): Физика Земли, – М.: Инфра-М, 2016. – 328 с.
31. Иванов П.Л. (1978): Разжижение и уплотнение несвязных грунтов при динамических воздействиях. – Л.: ЛПИ имени М.И. Калинина, 1978. – 52 с.
32. Ильясов И.Б., Кузнецова А., Эсенов Э.М. (2010): Об оценке сейсмической уязвимости существующей застройки жилых зданий в г. Ашхабаде // Проблемы сейсмологии в Узбекистане.-Ташкент, 2010. №7(1).- С.85–96.
33. Исмаилов В. А. (2019): Инженерно-сейсмологические основы разноуровневой оценки сейсмического риска. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Ташкент: Институт сейсмологии АН РУз, 2019.
34. Исмаилов В.А. (2021): Инженерно-сейсмологические основы сейсмического риска. – Ташкент, 2021. – 148 с.
35. Ишихара К. (2006): Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО Геореконструкция-Фундаментпроект, 2006. – 384 с.
36. Кажлаев Н.Г. (1977): Экономические проблемы строительства в сейсмических районах. – М.:Стройиздат, 1977. - 144 с.
37. Каррыев Б.С. (1995): Сейсмичность Копетдагского региона. – Ашхабад: Ёлым, 1995. – 235 с.
38. Каррыев Б.С., Ахмедова С.В., Голинский Г.Л. (1994): Сильные землетрясения на территории Туркменистана. Сейсмический бюллетень Туркменистана, №2, 1994. – с.21-47.
39. Каррыев Б.С., Эсенов Э.М. (2018): Ашхабадское землетрясение – катастрофа XX века // Строительство и архитектура Туркменистана, 3 (15) 2018. – с.25-31.

40. *Кейлис-Борок В.И., Канторович Л.В., Молчан Г.М.* (1973): Сейсмический риск и принципы сейсмического районирования // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. – М.: Наука, С.3-20 (Вычислительная сейсмология; Вып. 6).
41. *Кейлис-Борок В.И., Кронрод Т.Л., Молчан Г.М.* (1973): Алгоритмы для оценки сейсмического риска // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. – М.: Наука, 1973. С.21–43 (Вычислительная сейсмология; Вып. 6).
42. *Кириков Б. А.* (1992): Сейсмостойкость древних сооружений. – М.: Наука, 1992. – 136 с.
43. *Клычмурадов К.К.* (1977): Ашхабадское землетрясение и помощь народов СССР. – Ашхабад, Ылым, 1977. – 139 с.
44. *Клячко М.* и др. (2009): Методика обследования и паспортизации зданий и сооружений Сахалинской области. ФГУП НТЦСС, С.-Пб., 2009.
45. *Ковалев Е.Е.* (1976): Радиационный риск на земле и в космосе. – М.: Атомиздат, 1976.
46. *Кондорская Н.В., Шебалин Н.В.* (ред.) Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
47. *Короновский Н.В.* (2006): Общая геология, – М.: КДУ, 2006. – 528 с.
48. *Кофф Г.Л.* и др. (2009): Паспорт сейсмической надежности и безопасности строительного сооружения. АНО НИИЦ «ГЕОРИСК», – М., 2009.
49. *Кузьмин И.И., Махутов Н.А., Хетагуров С.В.* (1997): Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского университета экономики и финансов, 1997.
50. *Куликов Е.А., Медведева А.Ю., Файн И.В.* (2019): Оценка опасности цунами в Каспийском море. // Океанологические исследования, Том 47, № 5, 2019. – С.74–88.
51. *Курбацкий Е.Н.* (2018): Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения. Теория и приложения. – М.: ЕАСА (Eurasian SEISMO Association): АНО «СРОСЭкспертиза»: «Onebook.ru», 2018. – 156 с.
52. *Курмаев А.М.* (1989): Сейсмостойкие конструкции зданий. Справочник. – Кишинев: Карта Молдовеняскэ, 1989. – 453 с.
53. *Кутьков В.А., Безруков Б.А., Ткаченко В.В., Романцов В.П., Долженков И.В., Лебедев В.Н., Петров В.И.* (2002): Основные положения и требования нормативных документов в практике обеспечения радиационной безопасности атомных станций. – М.: Концерн «Росэнергоатом», 2002. – 292 с.

54. *Ларионов В.И., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Суцев С.П., Козлов М.А., Малаева Н.А., Барская Т.В.* (2017): Оценка сейсмического риска. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2017. № 2. С. 22-37.

55. *Левашов С.П.* (2013): Мониторинг и анализ профессиональных рисков в России и за рубежом. – Курган: Издательство Курганского государственного университета, 2013. – 344 с.

56. *Лопашев В.А., Караев Д.И.* (2021): Типология зданий жилой застройки Туркменистана. Материалы 5-го странового семинара по оценке подверженности рискам в Центральной Азии «К созданию единой региональной информационной системы по подверженности рискам для Центральной Азии: характеристика зданий, инфраструктуры и сельскохозяйственных земель в Туркменистане». – Ашхабад, Туркменистан, 1- 3 декабря 2021 г.

57. *Мавлянова Н.Г.* (2007): Сейсмический риск в Узбекистане. Дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Ташкент: Институт сейсмологии АН РУз, 2007, 248с.

58. *Марченко Б.И.* (2019): Анализ риска: основы управления рисками. Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный Федеральный университет, 2019. – 122 с.

59. *Махутов Н. А., Гаденин М. М., Юдина О. Н.* (2019): Научный анализ рисков в жизнеобеспечении человека, общества и государства // Проблемы анализа риска. Т. 16. 2019. № 2. С. 70–86.

60. *Медведев С.В.* (1962): Инженерная сейсмология, – М.: Госстройиздат, 1962. – 284 с.

61. *Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В.* (1965): Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.:МГК АН СССР, 1965. – 11 с.

62. Методика комплексной оценки индивидуального риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (МЧС России, ВНИИ ГОЧС, ЦИЭКС, СЦ ИГЭ РАН), – Москва, 2002. – 28 с.

63. Методика оценки последствий землетрясений (МЧС России, ВНИИ ГОЧС), – Москва. 1994. – 26 с.

64. Методика прогнозирования и оценки медицинских последствий землетрясений (МЧС России, ВНИИ ГОЧС), – Москва, 1993. – 34 с.

65. Методика прогнозирования последствий землетрясений (МЧС России, ВНИИ ГОЧС, ЦИЭКС и СЦ ИГЭ РАН), – Москва, 2000. – 23 с.

66. *Мкртычев, О.В., Джинчвелашвили Г.А.* (2014): Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости. Гипотезы и заблуждения: монография,. – 2-е изд. – М.: МГСУ, 2014 – 192 с.

67. *Мози К.* (1988): Предсказание землетрясений, – М.: Мир, 1988. – 382 с.
68. *Мушик Э., Мюллер П.* (1990): Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 208 с.
69. *Наливкин Д.В.* (1989): Воспоминания об Ашхабадском землетрясении 1948 года, – Ашхабад: БЛым, 1989. – 34 с.
70. *Никонов А.А.* (2018): Ашхабадская катастрофа 1948 года. Помнить уроки. Природа, № 11, 2018. – С. 52-59.
71. *Оразымбетов Н.О., Сердюков М.М., Шанин С.А.* (1960): Ашхабадское землетрясение 1948 г. Инженерный анализ последствий землетрясения. – М.: Госстройиздат, 1960. – 307 с.
72. *Осипов В.И., Ларионов В.И., Суцев С.П., Фролова Н.И., Угаров А.Н., Кожаринов С.В., Барская Т.В.* (2015): Оценка сейсмического риска территории г. Б. Сочи. Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2015. № 1. С. 3-19.
73. *Петрова Н.В.* (2006): Сейсмическая опасность и разрушительные землетрясения на территории Туркменистана. Материалы национального тренинга «Оценка сейсмического риска», – Ашхабад, 23-27 ноября 2009 г.
74. *Попов Ю.В.* (2018): Общая геология. Ростов-на-Дону; Таганрог: Южный федеральный университет, 2018. – 272 с.
75. *Потапов А.Д., Ревелис И.Л., Чернышев С.Н.* (2019): Землетрясения. Причины, последствия и обеспечение безопасности. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 343 с.
76. *Рагозин А.Л.* (Ред.) (2003): Оценка и управление природными рисками. Тематический том. – М.: Крук, 2003. – 320 с.
77. *Расулов Х.З.* (2020): Сейсмопрочность и сейсмопросадка лессовых грунтов. – Ташкент, Изд-во «Фан» АН Республики Узбекистан. 2020. – 335с.
78. *Раутиан Т.Г.* (1969): Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Труды ИФЗ РАН, 1969. №32 (199). С.88-93.
79. *Рикитаке Т.* (1979): Предсказание землетрясений, – М.: Мир, 1979. – 390 с.
80. *Рустанович Д.Н.* (1967): Сейсмичность территории Туркменской ССР и Ашхабадское землетрясение 1948 г. // Вопросы инженерной сейсмологии. 1967. Вып. 12. С. 3 – 96.
81. *Сарыева Г.Ч., Петрова Н.В., Безменова Л.В.* (2019): Копетдаг // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 96–107.
82. *Сарыева Г.Ч., Петрова Н.В., Безменова Л.В.* (2020): Копетдаг // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 23 (2014 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 82–91.

83. Сейсмическая шкала и методы измерения сейсмической интенсивности – М.: Наука, 1975. – 279 с.

84. СНТ 2.01.08-20 «Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Часть 1. Жилые, общественные, производственные здания и сооружения». – Ашхабад, 2020. – 49 с.

85. СНТ 2.01.08-99* «Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Раздел 1. Жилые, общественные, производственные здания и сооружения». – Ашхабад, 2008. – 42 с.

86. СНТ 3.03.05-18 «Инструкция по оценке технического состояния и усилению конструкций и основания зданий и сооружений», 2018.

87. *Соболев Г.А.* (1993): Основы прогноза землетрясений. – М.: Наука, 1993. – 313 с.

88. *Соколов В.Ю.* (2012): О моделировании пространственного распределения сильных движений грунта при оценках сейсмической опасности и риска // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2012. – Т.39, №2. – С. 5-22.

89. *Соснин А.В.* (2016): Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчёта зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 12–19.

90. *Токтосовцев А.М.* (2007): Электромагнитные предвестники землетрясений. Каракол: 2007. – 312 с.

91. *Тягунов С.А.* (2021): Отчет по Техническому заданию: «Определение сейсмической уязвимости для каждой из репрезентативных категорий зданий г. Ашхабада», Фонды ИСФА, – Берлин-Ашхабад, 2021. – 76 с.

92. *Тягунов С.А.* (2022): Отчет по Техническому заданию: «Оценка сейсмического риска территории г. Ашхабада», Фонды ИСФА, Берлин-Ашхабад, 2022. – 64 с.

93. *Тягунов С.А., Николаев М.В.* (2022): Отчет по Техническому заданию: «Создание специализированной ГИС для выполнения работ по оценке и картированию сейсмической опасности и риска на территории Ашхабада», Фонды ИСФА, – Берлин-Ашхабад, 2022. – 69 с.

94. *Фролова Н.И., Ларионов В.И.* (2005): Зонирование индивидуального сейсмического риска для территории России. В сборнике: Актуальные проблемы регулирования природной и техногенной безопасности в XXI веке Материалы десятой Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. МЧС России. 2005. С. 121-130.

95. Харитонов В.А., Шолохов В.А. (1989): Организация восстановительных работ после землетрясения. – М.: Стройиздат, 1989. – 272 с.
96. Чернов Ю.К. (1989): Сильные движения грунта и количественная оценка сейсмической опасности территорий. – Ташкент: Фан, 1989. – 296 с.
97. Чернов Ю.К., Чернов А.Ю. (2017): Вероятностные модели сейсмических воздействий для прогнозирования сейсмической опасности в инженерных целях // Геология и геофизика Юга России, № 2, 2017. – С.116-128.
98. Шахраманьян М.А. (2000): Оценка сейсмического риска и прогноз последствий землетрясений в задачах спасения населения. (теория и практика) / – Москва, 2000. (2-е издание, переработанное и дополненное).
99. Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Гайфуллин З.П., Бабусенко М.С. (2004): Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (6). С. 5-15.
100. Шебалин Н.В. (1968): Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. С. 95-121.
101. Шебалин Н.В. (2003): Количественная макросеймика (фрагменты незавершенной монографии) // Вычисл. сейсмология. – М.: ГЕОС, 2003. – Вып.34. – С. 57-200.
102. Штейнберг В.В., Сакс М.В., Антикаев Ф.Ф., Алказ В.Г., Гусев А.А., Ерохин Л.Ю., Заградник И., Кендзера А.В., Коган Л.А., Лутиков А.И., Попова Е.В., Раутиан Т.Г., Чернов Ю.К. (1993): Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) // Вопросы инженерной сейсмологии. 1993. Т. 34. С. 5–94.
103. Alam, Md Nurul & Alam, M. Shahria & Tesfamariam, Solomon. (2012): Buildings' seismic vulnerability assessment methods: A comparative study. *Natural Hazards*. 62. 405–424.
104. Algermissen, S. T., Rinehart, W., Dewey, J., Steinbrugge, K. V., Lagorio, H. J., Degenkolb, H. J., Cluff, L. S., McClure, F. E., Scott, S., and Gordon, R. F. (1972): A study of earthquake losses in the San Francisco Bay Area: Data and analysis, Washington, D.C., NOAA, 1972.
105. Allen, R.M., P. Gasparini, O. Kamigaichi and M. Böse (2009): The status of earthquake warning around the world: an introductory overview, *Seismol. Res. Lett.*, 80 (5), 682-693.
106. Artikov T.U., Ibragimov R.S., Ibragimova T.L., Mirzaev M.A., 2020. Models of the macroseismic field earthquakes and their influence on seismic hazard assessment values for Central Asia. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (3), 606–623.

107. ATC-13 (1985): Earthquake Damage Evaluation Data for California. Federal Emergency Management Agency, 1985. – 492 p.
108. Aven, T. and Zio, E. (2011): Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making, *Reliabil. Eng. Syst. Safety*, 96, 64–74.
109. *Bachmann H.* (2002): Seismic Conceptual Design of Buildings – Basic principles for engineers, architects, building owners, and authorities, Biel 2002, – 81 p.
110. *Baker, J. W. and Cornell, C. A.* (2008): Uncertainty Propagation in Probabilistic Seismic Loss Estimation, *Struct. Safety*, 30, 236–252.
111. *Biglari M., Formisano A.* (2020): Damage Probability Matrices and Empirical Fragility Curves From Damage Data on Masonry Buildings After Sarpol-e-zahab and Bam Earthquakes of Iran. *Frontiers in Built Environment*, Vol.6, February 2020. – P.1-12.
112. *Bindi D., Parolai S., Oth A., Abdrakhmatov K., Muraliev A., Zschau J.*, 2011. Intensity Prediction Equations for Central Asia. *Geophysical Journal International* 187 (1), 327–337.
113. *Bommer, J.J., Scherbaum, F.* (2008): The use and misuse of logic trees in probabilistic seismic hazard analysis. *Earthquake Spectra*. 2008. 24 (4). 997–1009.
114. *Bormann, P., Klinge K., Wendt S.* (2014): Data Analysis and Seismogram Interpretation. - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2)*, Potsdam: Deutsches Geo Forschungs Zentrum GFZ, 1-126.
115. *Böse M., Danciu L., Papadopoulos A. N.* et al (2024): Towards a dynamic earthquake risk framework for Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 24 (2), 583-607.
116. *Bryant P.A., Croft J., Cole P.* (2018): Integration of risks from multiple hazards into a holistic ALARA/ALARP demonstration. *Journal of Radiological Protection*, 2018. 38. – pp.81-91.
117. *Chen, H. and Sun, B.* (2008): Study on Loss Ratio of Urban Building Damages, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 12–17 October 2008, Beijing, China, 2008.
118. *Chen, Y., Chen, Q. F., Liu, J., Chen, L., and Li, J.* (2002): *Seismic Hazard and Risk Analysis: A Simplified Approach*, Science Press, Beijing, 228 pp.
119. *Chen, Y., Chen, X. L., Fu, Z. X., Ying, Z. Q., and Yang, M. D.* (1992): *Estimating Losses from Earthquakes in China in the Forthcoming 50 Years*, Seismological Press, Beijing, 60 pp.
120. *Coburn A., Spence R.* (2002): *Earthquake Protection*. 2nd Edition, Wiley, 2002. – 424 p.

121. *Coburn A.W., Spence R.J.S., Pomonis A.* (1994): Vulnerability and Risk Assessment, Disaster Management Training Programme, 2nd Edition, UNDP, DHA, 1994.
122. *Cornell, C. A.* (1968): Engineering seismic risk analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583–1606, 1968.
123. *Crowley H, Cerisara A, Jaiswal K, Keller N, Luco N, Pagani M, Porter K, Silva V, Wald D, Wyss B* (2010): GEM1 seismic risk report: part 2, GEM Technical Report 2010-5. GEM Foundation, Pavia, Italy.
124. *Crowley H, Colombi M, Crempien J, Erduran E, Lopez M, Liu H, Mayfield M, Milanese M* (2010): GEM1 seismic risk report: part 1, GEM Technical Report 2010-2015. GEM Foundation, Pavia, Italy.
125. *Danciu L., Monelli D., Pagani M. and Wiemer S.* (2010): GEM1 Hazard: Review of PSHA software, GEM Technical Report 2010–2, GEM Foundation, Pavia, Italy.
126. *Deierlein G.G., Reinhorn A.M., Willford M.R.* (2010): Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers 2010.
127. *Erdik, M. Şeşetyan K., Demircioğlu M.B., Hancılar U., Zülfikar C. Tüzün C., Harmandar E.* (2014): Rapid Earthquake Loss Assessment After Damaging Earthquakes. In: Ansal, A. (eds) Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, vol 34., pp 53-95.
128. *Erdik, M., Rashidov, T., Şafak, E., Turdukulov, A.* (2005): Assessment of seismic risk in Tashkent, Uzbekistan and Bishkek, Kyrgyz Republic. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 25. 473-486.
129. Eurocode 8 – Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings.
130. *Fajfar, P.* (2000): A nonlinear analysis method for performance-based seismic design, Earthquake Spectra 16(3): 573–92.
131. FEMA 154 (2002): Rapid Visual Screening of Buildings for. Potential Seismic Hazards: A Handbook. Edition 2, March 2002. – 140 p.
132. FEMA 155 (2002): Rapid Visual Screening of Buildings for. Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation. Edition 2, March 2002. – 99 p.
133. FEMA/NIBS (1999): Earthquake Loss Estimation Methodology – HAZUS, Technical Manual, Vol. 1, Federal Emergency Management Agency (National Institute of Building Sciences) Document Number 5201, 258 p.
134. FEMA/NIBS (2003): HAZUS-MH Multi-Hazard Loss Estimation Methodology – Earthquake Model. Technical Manual. Federal Emergency Management Agency. Department of Homeland Security, Washington D.C., U.S.A.

135. *Fleming, K., Parolai, S., Garcia-Aristizabal, A., Tyagunov, S., Vorogushyn, S., Kreibich, H., Mahlke, H.* (2016): Harmonizing and comparing single-type natural hazard risk estimations. - *Annals of Geophysics*, 59, 2, pp. S0216.
136. *Foulser-Piggott, R., Bowman G., Hughes M.* (2020): A Framework for Understanding Uncertainty in Seismic Risk Assessment. *Risk Analysis*. 2020, 40(1): 169-182.
137. *Frolova N.I., Larionov V. I., Sushchev S. P., Bonnin J.* (2012): Seismic and Integrated Risk Assessment and Management with Information Technology Application. In: *Proceedings of the 15th WCEE, 2012*.
138. *Frolova, N., Larionov, V., Bonnin, J., Suchshev, S., Ugarov, A., and Malaeva, N.* (2020): Impact database application for natural and technological risk management, *Nat. Haz. Earth Syst.Sci.*, 20,95–106.
139. *Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Kozlov, M.A.* (2017): Seismic risk assessment and mapping at different levels. *Natural Hazards*, 2017, 88, 43–62.
140. *Frolova, N.I., Larionov, V.I., Bonnin, J., Sushchev, S.P., Ugarov, A.N., Kozlov, M.A.* (2017): Loss caused by earthquakes: rapid estimates. *Natural Hazards*, 88, 63–80.
141. *Giardini D.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. Is. 6. P. 957–974.
142. *Giardini, D., Grünthal. G., Shedlock, K.M., Zhang, P.* (1999): The GSHAP Global Seismic Hazard Map // *Annali di Geofisica*, Vol.42, N. 6, 1999. – P. 1225-1230.
143. *Grandori, G. and Benedetti, D.* (1973): On the choice of the acceptable seismic risk, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 2, 3–9, 1973.
144. *Grünthal G.* (ed.) *European Macroseismic Scale 1998 EMS-98*. Luxembourg: Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, 1998. Vol. 15. – 99 p.
145. *Grünthal, G. and Wahlström, R.* (2001): Sensitivity of Parameters for Probabilistic Seismic Hazard Analysis Using a Logic Tree Approach, *J. Earthquake Eng.*, 5, 309–328.
146. *Grünthal, G., Thieken, A. H., Schwarz, J., Radtke, K. S., Smolka, A., Merz, B.* (2006): Comparative risk assessments for the city of Cologne, Germany - storms, floods, earthquakes. - *Natural Hazards*, 38, 1-2, p. 21-44. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11069-005-8598-0>
147. *Gueguen P.* (2013): *Seismic Vulnerability of Structures*, ISTE, Wiley, 2013. – 368 p.
148. *Gutenberg, B., and Richter, C.* (1956): Magnitude and energy of earthquakes. *Annals of Geophysics*, 9(1), 1-15.

149. *Hachem, M.M.* (2004): BISPEC: Interactive Software for the Computation of Unidirectional and Bidirectional Nonlinear Earthquake Spectra. – Structures 2004: Building on the Past - Securing the Future – Proceedings of 2004 Structures Congress Held in Nashville, TN, May 22–26.
150. *Heaton, T.H., Tajima, F. & Mori, A.W.* (1986): Estimating ground motions using recorded accelerograms. *Surv Geophys* 8, 25–83.
151. *Hopkin P.* (2010): *Fundamentals of Risk Management*. Kogan Page, 2010. – 384 p.
152. *Hwang, H. M., Xu, M., and Huo, J.-R.* (1994): *Estimation of Seismic Damage and Repair Cost of the University of Memphis Buildings*, Memphis, Tennessee, 1994.
153. *Idriss I. M.* (1985): *Evaluating Seismic Risk in Engineering Practice*. In *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 12-16 August 1985. San Francisco. Vol 1, pp. 255–320.
154. *Idriss I.M., Boulanger R.W.* (2008): *Soil Liquefaction During Earthquakes*, EERI, 2008. – 264 p.
155. IRIS: Сайт Консорциума сейсмологических институтов (www.iris.edu)
156. ISDR (2009): *UNISDR Терминологический Глоссарий по снижению риска бедствий*, 2009. – 43 с.
157. ISDR-RADIUS (2000): *Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters*, Geneva, Switzerland: IDNDR Secretariat, United Nations, 38 p.
158. JMA (2007): Сайт Японского Метеорологического Агентства (ЯМА). (<https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew1.html>)
159. *Kanamori, Hiroo* (1977): The Energy Release in Great Earthquakes. *Journal of Geophysical Research* 82 (20), 1977. pp 2981–2987.
160. *Kappes, M.S., M. Keiler, K. von Elverfeldt and T. Glade* (2012): Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review, *Natural Hazards*, 64, 1925–1958; doi:10.1007/s11069-012-0294-2.
161. *Kircher, C. A., Reitherman, R. K., Whitman, R. V., and Arnold, C.* (1997): Estimation of Earthquake Losses to Buildings, *Earthquake Spect.*, 13, 703–720, 1997.
162. *Kircher, C.A., Whitman R.V., Holmes W.T.* (2006): HAZUS earthquake loss estimation methods, *Nat. Hazards Rev.* 7, 45–59.
163. *Kishore N., Thampan P.V.* A Review on Earthquake Vulnerability Assessment (2017): *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol.04, Issue 03, 2017, pp. 1885–1889.

164. *Kolluru, R. V., Bartell, S. M., Pitblado, R. M., & Stricoff, R. S.* (Eds.). (1996): Risk assessment and management handbook. McGraw-Hill, New York, 1996.
165. *Kramer S.L.* (1996): Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, 1996. – 653 p.
166. *Lay T., Wallace T.C.* (1995): Modern Global Seismology. New York, London: Academic Press, 1995. – 534 p. – (International Geophysics, Vol. 58).
167. *Li S., Chen Y., Yu T.* (2021): Comparison of macroseismic-intensity scales by considering empirical observations of structural seismic damage. *Earthquake Spectra*. 2021;37(1): 449-485.
168. MACEC 3.4 (2021): The MATLAB Toolbox for Experimental and Operational Modal Analysis. User's Manual. 2021.
169. McGuire, R.K. (2001): Deterministic vs. probabilistic earthquake hazards and risks. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 21, 377–384.
170. Melchers R., Beck A. (2018): Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd Edition. – Wiley, 2018. – 528 p.
171. *Meskouris K., Hinzen K.-G., Butenweg C., Mistler M.* (2011): Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen - Anwendung – Beispiele. Vieweg+Teubner Verlag; 3., akt. u. erw. Aufl. 2011. – 736 S.
172. *Metych, M.* (2024): “Natural Disaster”. *Encyclopedia Britannica*, 28 May. 2024, <https://www.britannica.com/science/natural-disaster>. Accessed 25 June 2024
173. *Mirjalilov A., Sudo K., Rashidov T., Khakimov Sh., Shaw R., Tyagunov S.* (2000): RADIUS Project in Tashkent, Uzbekistan // Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. pp. 368–379.
174. *Miyakoshi, J., Hayashi, Y., Tamura, K., and Fukuwa, N.* (1997): Damage ratio functions of buildings using damage data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, Proceedings of the 7th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR '97), Vol. 1, 349–354, Kyoto, Japan, 1997.
175. *Molina, S., Lang, D.H., Lindholm, C.D.* (2010): SELENA – An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *Computers & Geosciences*, Vol. 36, Issue 3, 2010, 257-269.
176. *Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M, Le Brun, B., Depinois, S., Masure Ph.* and the RISK-UE team (2004): The European RISK-UE Project: An advanced approach to earthquake risk scenarios, in: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1–6 August, paper no. 3329.

177. *Musson R.* (2012): On the nature of logic trees in probabilistic seismic hazard assessment. *Earthquake Spectra*, 2012; 28(3): 1291–1296.
178. *Musson R.V.W.* (2021): Great Earthquakes. In: *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Ed.: H.K. Gupta. Verlag, Springer International Publishing. – pp. 708–716.
179. *Musson, R., Grünthal, G., Stucchi, M.* (2010): The comparison of macroseismic intensity scales. – *Journal of Seismology*, 14, 2, 413–428.
180. *Nakamura, Y.* (1989): A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quart. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, 30, 25–33.
181. *Nakamura, Y., J. Saita and T. Sato* (2011): On an earthquake early warning system (EEW) and its applications, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 31, 127–136.
182. *Nian V.* (Ed.) (2020): *Advanced Security and Safeguarding in the Nuclear Power Industry: State of the art and future challenges*. Academic Press, 2020. – 253 p.
183. NUREG (2016): NUREG KM-0010, WASH-1400 - The Reactor Safety Study - The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactors.
184. *Ozcebe, Guney & Sucuoglu, Haluk & Yucemen, M. & Yakut, Ahmet & Kubin, Joseph.* (2006): *Seismic Risk Assessment of Existing Building Stock in Istanbul: A Pilot Application in Zeytinburnu District*. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering April 18–22, 2006, San Francisco, California, USA.
185. *Pagani, M. Monelli, D. Weatherill, G. Danciu, L. Crowley, H. Silva, V. Henshaw, P. Butler, L. Nastasi, M. Panzeri, L. Simionato, M. Vigano, D.* (2014): OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model. *Seismological Research Letters*, vol. 85, issue 3, pp. 692–702.
186. *Pilz, M., Abakanov, T., Abdrakhmatov, K., Bindi, D., Boxberger, T., Moldobekov, B., Orunbaev, S., Silacheva, N., Ullah, S., Usupaev, S., Yasunov, P. and Parolai, S.* (2015): An overview on the seismic microzonation and site effect studies in Central Asia, *Annals of Geophysics*, 58(1).
187. *Pitilakis K., Crowley H., Kaynia A.M.* (Eds) (2014): *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, Springer, 2014. – 420 p.
188. *Pitilakis K., Franchin P., Khazai B., Wenzel H.* (Eds) (2014): *SYNER-G: Systemic Seismic Vulnerability and Risk Assessment of Complex Urban, Utility, Lifeline Systems*, Springer, 2014. – 384 p.

189. *Porter, K., Kennedy, R. and Backman, R.* (2007): Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering, *Earthquake Spectra* 23(2): 471–89.
190. *Rainieri C., Fabbrocino G.* (2014): *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications.* Springer, 2014. – 322 p.
191. *Rajasekaran S.* (2009): *Structural Dynamics of Earthquake Engineering: Theory and Application using Mathematica and Matlab*, 2009.
192. *Reynders E.* (2012): System identification methods for (operational) modal analysis: review and comparison // *Archives of Computational Methods in Engineering.* – 2012. – Vol. 19, № 1. – P. 51–124.
193. *Reynders E., and G. De Roeck* (2014): *Operational Modal Analysis in Civil Engineering: An Overview.* In: Beer M., Kougiumtzoglou I., Patelli E., Au IK. (eds) *Encyclopedia of Earthquake Engineering.* Springer, Berlin, Heidelberg.
194. *Shedlock, K. M., Giardini, D., Grünthal, G., Zhang, P.* (2000): The GSHAP global seismic hazard map. - *Seismological Research Letters*, 71, 6, P. 679-689.
195. *Silva V.* (2019): Uncertainty and Correlation in Seismic Vulnerability Functions of Building Classes. *Earthquake Spectra*, Volume 35, No. 4, 1515–1539.
196. *Silva V., Calderon A., Caruso M., Costa C., Dabbeek J., Hoyos M.C., Karimzadeh Z., Martins L., Paul N., Rao A., Simionato M., Yepes-Estrada C., Crowley H., Jaiswal K.* (2023): Country / Territory Seismic Risk Profiles of the GEM Foundation, GitHub. <https://github.com/gem/risk-profiles/>
197. *Silva V., Calderon A., Caruso M., Costa C., Dabbeek J., Hoyos M.C., Karimzadeh Z., Martins L., Paul N., Rao A., Simionato M., Yepes-Estrada C., Crowley H., Jaiswal K.* (2023): Global Earthquake Model (GEM) Seismic Risk Map (version 2023.1), <https://doi.org/10.5281/zenodo.8409623>
198. *Silva V., D. Amo-Oduro, A. Calderon, J. Dabbeek, V. Despotaki, L. Martins, A. Rao, M. Simionato, D. Viganò, C. Yepes-Estrada, A. Acevedo, H. Crowley, N. Horspool, K. Jaiswal, M. Journey, M. Pittore* (2018). Global Earthquake Model (GEM) Seismic Risk Map (version 2018.1), DOI: 10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-RISK-MAP- 2018.
199. *Silva, V., Crowley, H., Pagani, M.* et al. (2014): Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Nat.Hazards* 72, 1409–1427.
200. *Sokolov V.Y.* (2002): Seismic Intensity and Fourier Acceleration Spectra: Revised Relationship. *Earthquake Spectra.* 2002;18(1):161-187.

201. *Sokolov V.Y., Chernov Y.K.* (1998): On the Correlation of Seismic Intensity with Fourier Amplitude Spectra. *Earthquake Spectra*. 1998;14(4):679–694.
202. *Srikanth, T. & Ramancharla, Pradeep & Singh, A. & Rastogi, Bal & Kumar; Santosh.* (2010): Earthquake Vulnerability Assessment of Existing Buildings in Gandhidham and Adipur Cities, Kachchh, Gujarat (India). *European Journal of Scientific Research*. 41. 336-353.
203. *Stankiewicz, J., Bindi, D., Oth, A. and Parolai, S.* (2015): Toward a cross-border early-warning system for Central Asia, *Annals of Geophysics*, 58(1).
204. *Talley H.C. Jr., and Cloud W.K.* (1962): United States Earthquakes 1960. US. Department of Commerce & Coast and Geodetic Survey, U.S. Government Printing Office, Washington, 1962. – 90 p.
205. *Tellegen E.* (1989): The Dutch National Environmental Policy Plan. *The Netherlands Journal of Housing and Environmental Research*. Vol. 4, No. 4, 1989, pp. 337-345.
206. *Trendafiloski, G. & Milutinovic, Z.* (2004): GIS-oriented method for elaboration of probabilistic earthquake scenarios, in: Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13 WCEE), Vancouver, BC, Canada, 1–6 August, paper no. 1809.
207. *Trifunac, M. D.* and A. G. Brady (1975): On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* 65, 139–162.
208. *Trogrlić R. Š., Reiter K., Ciurean R.L.* et al (2024): Challenges in assessing and managing multi-hazard risks: A European stakeholders perspective, *Environmental Science & Policy*, Volume 157, 2024, 1–13.
209. *Tyagunov, S., Abakanov T., Abdrakhmatov K., Begaliev U., Bindi D., Charyev M., Ilyasov I., Ishuk A., Mavlyanova N., Mikhailova N., Moldobekov B., Ospanov A., Parolai S., Pilz M., Pittore M., Rashidov T., Saidiy S., Ullah S., Usmanova M., Wieland M., Yasunov P., Ziyautdinov P., Zschau J.* (2012): Seismic Risk Assessment in the Countries of Central Asia. Proc. International Conference on “Complexity in earthquake dynamics: From nonlinearity to earthquake prediction and seismic stability”, Tashkent, Uzbekistan, 2012. – pp. 15–26.
210. *Tyagunov, S., Grünthal G., Wahlström, R. Stempniewski, L., & Zschau, J.* (2006): Seismic Risk Mapping for Germany, *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Special Issue: Methods for Risk Assessment and Mapping in Germany, 6, 2006, 573–586.

211. *Tyagunov, S., Pittore, M., Wieland, M., Parolai, S., Bindi, D., Fleming, K., and Zschau, J.* (2014): Uncertainty and Sensitivity Analyses in Seismic Risk Assessments on the Example of Cologne, Germany, *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 14, 1625–1640.
212. UNISDR (2009): Терминологический глоссарий по уменьшению риска бедствий. Международная стратегия ООН по уменьшению опасности бедствий, Женева, Швейцария, 2009.
213. USGS: Сайт Геологической службы США, (www.usgs.gov)
214. *Vamvatsikos, D., Kouris, L., Panagopoulos, G., Kappos, A., Nigro, E., Rossetto, T., Lloyd, T., Stathopoulos, T.* (2010): Structural Vulnerability Assessment under Natural Hazards: A review. COST ACTION C26: Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events - Proceedings of the Final Conference.
215. WASH-1400 (1975): Reactor safety study – an assessment of accident risk in U. S. commercial nuclear power plants, WASH-1400–1974 USAEC, Washington.
216. *Whitman, R. and Cornell C. A.* (1976): Design, in: *Seismic risk and engineering decisions*, edited by: Lomnitz, C. and Rosenblueth, E., Elsevier, Amsterdam – Oxford – New York, 1976.
217. *Whitman, R. V., Biggs, J. M., Brennan, J. E., Cornell, C. A., Neufville, R. L., and Vanmarcke, E. H.* (1975): Seismic design decision analysis, *ASCE Struct. Eng. J.*, 101, 1067–1084, 1975.
218. *Xie W., Ni S., Liu W., Jiang W.* (2019): *Seismic Risk Analysis of Nuclear Power Plants*, New York: Cambridge University Press, 2019.
219. *Yoe C.* (2019): *Principles of Risk Analysis: Decision Making Under Uncertainty*. CRC Press, 2019. – 816 p.
220. *Zonno, G., Cella, F., Luzi, L., Menoni, S., Meroni, F., Ober, G., Pergalani, F., Petrini, V., Tomasoni, R., Carrara, P., Musella, D., Garcia-Fernandez, M., Jimenez, M. J., Canas, J. A., Alfaro, A. J., Barbat, A. H., Mena, U., Pujades, L. G., Soeters, R., Terlien, M. T. J., Cherubini, A., Angeletti, P., Di Benedetto, A., Caleffi, M., Wagner, J.J., and Rosset, P.* (1998): Assessing seismic risk at different geographical scales: concepts, tools and procedures, in: *Proc. of the 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris, France, CD-ROM.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Введение	10

I ГЛАВА

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ	17
1.1. Землетрясения и причины их возникновения	17
1.2. Краткие сведения о строении Земли	19
1.3. Тектоника плит	22
1.4. Тектонические землетрясения и их характеристики	25
1.5. Сейсмические волны и их распространение	29
1.6. Регистрация землетрясений и сейсмических колебаний	34
1.7. Измерение силы землетрясений	40
1.8. Статистика землетрясений и наиболее известные землетрясения	49
1.9. Самые известные землетрясения на территории Туркменистана	57

II ГЛАВА

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ	63
2.1. Сейсмическая опасность и эффекты землетрясений	63
2.2. Макросейсмические шкалы	77
2.3. Количественные параметры сейсмических воздействий	86
2.4. Оценка сейсмической опасности	91
2.5. Сейсмическое районирование территорий	96
2.6. Глобальная карта сейсмической опасности	98
2.7. Сейсмическое районирование территории Туркменистана	101
2.8. Учет грунтовых условий. Сейсмическое микрорайонирование	103
2.9. Прогноз и предвестники землетрясений	106

III ГЛАВА

СЕЙСМИЧЕСКАЯ УЯЗВИМОСТЬ	113
3.1. Понятие сейсмической уязвимости	113
3.2. Повреждаемость зданий при землетрясениях	116
3.3. Классификация сейсмической уязвимости	121
3.4. Количественное представление сейсмической уязвимости зданий	124
3.5. Типы зданий в Туркменистане и оценка их повреждаемости	132
3.6. Построение функций сейсмической уязвимости	137
3.7. Прямая и обратная задача сейсмостойкости	142
3.8. Проектирование и расчеты сейсмостойких зданий	143
3.9. Сейсмическая оценка существующих зданий	146
3.10. Приближенные методы сейсмической оценки зданий	158
3.11. Оценка сейсмической уязвимости застроенных территорий	164

IV ГЛАВА	
СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК	170
4.1. Риски в человеческой жизнедеятельности.	170
4.2. Количественная оценка сейсмического риска.	175
4.3. Существующие подходы к оценке сейсмического риска.	187
4.4. Оценка сейсмического риска на примере Ашхабада	205
4.5. Мульти-риски, их оценка и сравнение.	233
V ГЛАВА	
УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ	238
5.1. Цикл сейсмических катастроф.	238
5.2. Методы управления риском	239
5.3. Концепция приемлемого риска.	244
5.4. Оптимизация антисейсмических мероприятий на основе анализа риска.	257
5.5. Разработка плана действий на основе сценарного разрушительного землетрясения.	266
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	273
Инструкция: как обезопасить себя при землетрясении	275
Терминологический словарь.	280
Список литературы	293

Сергей Александрович Тягунов

СЕЙСМИЧЕСКИЙ РИСК

*Учебное пособие для высших
учебных заведений*

Редактор

Тех. редактор

Компьютерная вёрстка

М. Курбанов

Ю. Пескова

О. Хандовлетова



*Подготовлено к печати
при содействии ПРООН Туркменистана*

Подписано в печать 00.00.2024

Формат 60x90 ¹/₁₆. Гарнитура Литературная.

Печ. лист 19,5. Усл. печ. листов 19,5. Уч.-изд. листов, 14,12.

Издательский № 132. Заказ № 00. Тираж 450.

Издательство «Ылым» Академии наук Туркменистана.
744000. Ашхабад, Туркменбаши шаёлы, 18.

Типография «Ылым» Академии наук Туркменистана
744000. Ашхабад, Битарап Туркменистан шаёлы, 15.