



Статья

Сценарная оценка сейсмического риска для Рейкьявика

Столичная зона

Бьярни Бессасон^{1,*}, Раджеш Рупахети¹ и Йон Орвар Бьярнасон²¹ Факультет гражданской и экологической инженерии, Университет Исландии, 107 Рейкьявик, Исландия;² rajesh@hi.is Страхование от стихийных бедствий Исландии, 201 Копавогур, Исландия;

jon@nti.is * Адрес для переписки: bb@hi.is

Аннотация: Около двух третей населения Исландии проживает в столичном районе Рейкьявика (RCA), к которому относятся близлежащие действующие вулканы и сейсмические зоны. Всего за период 1900–2019 гг. в этих зонах произошло 53 землетрясения с $M_w \geq 5.0$. Два крупнейших события на полуострове Рейкьявик, $M_w 6.36$ и $M_w 6.12$, произошли в 1929 и 1968 годах соответственно. Оба события произошли менее чем в 20 км от окраины RCA. В конце 2020 года сейсмичность на полуострове значительно возросла из-за внедрения магматических вулканических активности, что к настоящему времени привело к трем извержениям в 2021, 2022 и 2023 годах, а также к шести землетрясениям с $M_w \geq 5.0$. Судя по историческим и геологическим данным, продолжающаяся активность, вероятно, является начальной фазой предстоящего активного периода, к которому может продолжаться течение многих десятилетий и может спровоцировать более крупные землетрясения, подобные тем, к которым произошли в 1929 и 1968 годах. Дальше на восток, в Южной Исландии. Зона, в июне 2000 г. произошло два землетрясения магнитудой 6,52 и 6,44 балла, а в мае 2008 г. произошло землетрясение магнитудой 6,31 балла. В обоих случаях пострадало около 5000 зданий. Данные о страховых потерях в результате этих событий были использованы для разработки эмпирических моделей уязвимости и малоэтажных зданий. В этом исследовании данные о потерях используются для калибровки моделей сейсмической уязвимости с точки зрения расхождения между историческим и местом. Для сценария заданной величины обеспечивает более простое представление сейсмической уязвимости и полезно для планирования действий в чрезвычайных ситуациях и управления стихийными бедствиями. Эти модели также используются для расчета различных типов карт сценарного риска для RCA на случай повторения землетрясения 1929 года.

Ключевые слова: готовность к стихийным бедствиям; аварийное планирование; сейсмическая уязвимость; сейсмическая хрупкость; карты риска



Цитирование: Бессасон, Б.; Рупахети, Р.;

Бьярнасон, Дж.О. На основе сценариев

Оценки сейсмического риска для

Столичного района Рейкьявика. Здания

2023, 13, 2919. <https://doi.org/10.3390/buildings13122919>.

зданий.

Академический редактор: Ксавье Роман

и Анна-Лис Греко

Поступила: 29 сентября 2023 г.

Пересмотрено: 14 ноября 2023 г.

Принято: 20 ноября 2023 г.

Опубликовано: 23 ноября 2023 г.



Копирайт: © 2023 авторами.

Лицензия: MDPI, Базель, Швейцария.

Эта статья находится в открытом доступе.

распространяется на условиях и

условия Creative Commons

Лицензия с указанием автора (CC BY)

([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

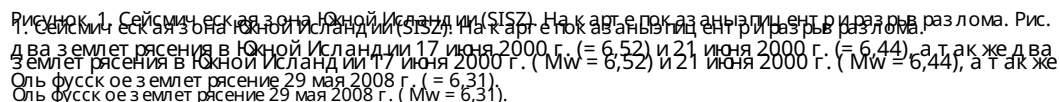
4.0/).

1. Введение

Сейсмическая устойчивость имеет решающее значение для сообществ и инфраструктур подверженных сейсмическим опасностям. Оно определяется как способность систем противостоять разрушительным землетрясениям, адаптироваться к ним и восстанавливаться после них. Укрепление инфраструктуры совершенствование строительных норм и правил, повышение готовности к чрезвычайным ситуациям, а также повышение уровня образования и знаний могут коллективно снизить потенциальные последствия сейсмических событий. Для формулирования стратегий и политик, направленных на повышение сейсмической устойчивости, жизненно важно иметь знания о сейсмическом риске для рассматриваемого сообщества [1–3]. Настоящее исследование сосредоточено на оценке уязвимости и оценке сейсмического риска на основе сценариев для столичного района Рейкьявика (RCA) в Исландии. В качестве сценарного события используется известное прошлое землетрясение магнитудой 6,36 балла, представляющее собой один из наиболее разрушительных сценариев для RCA среди всех известных землетрясений в его окрестностях.

Помимо моделей сейсмической опасности и воздействия, ключевым фактором оценки сейсмического риска является сейсмическая уязвимость конструкций и инфраструктуры. Модели уязвимости могут быть основаны (1) методах, основанных на суждениях [4,5]; (2) аналитическое моделирование и эксперименты [6,7]; (3) эмпирические методы использования данных о потерях, полученных в ходе исследований после землетрясений [8–10]; и (4) гибридные методы комбинации двух или более этих методов. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Когда существуют локальные наборы данных о потерях, они всегда предлагают ценную информацию для изучения и использования для прогнозирования потерь для аналогичных будущих с

Вследствие этого для большинства случаев можно использовать в качестве базисных данных данные о землетрясениях, а именно за 2000–2016 гг. В 2000 г. был раздел, описывающий 2000 г., произошедшие в сейсмической зоне Южной Исландии (SISZ). Севернее в 2000 году, действующий перегиб восточной магнитической модели (рис. 1) был установлен в результате сравнения разницы разломов в состоянии примерно 16 км друг от друга (рис. 1). Длины разрыва повреждения по азимуту раздвигаются с востока на запад. В первом сейсмическом предположении магнитическая кристаллографическая ориентация и величина (рис. 1) разломов восточной и западной частей разлома (рис. 1) предположительно равны – 5000 малоэтажных зданий восточной части (рис. 1) и 5000 зданий.



Применяемый локальный GMPM, использованный в недавних оценках местной уязвимости [13,16,17] прогнозирует PGA, используя три переменные, а именно:

где Mw — магнитуда момента а. RJB — расстояние Джойнера–Бюра [19], к от оро е расстояние от мест а до поверхности и проек ции рлсост и разрыва. Для верт ика льно го разлома плоскост и, к ак при сдвиговых землет рясениях в июне 2000 и 2008 гг., э то расстояние до поверхности след прич инного разлома (см. рисунок 1). Нак онец, S — э то факт ормест а, к от оры й принимается к ак 0 для каменист ых уч аст ков и 1 для т вердых грун тов. На основе геологич еских карт Исландии. Инст ит ут ест ественной ист ории [20], все основные поселения и поч т и все заст роенные т еррит ории. Пост радав шие от землет рясения в мае 2008 г. предст авля ют собой уч аст к и к а мней или лавы (см. т ак же [21]). Для пост радав ших районах в июне 2000 года, боль шинство ст роит ельн ых площа док т ак же предст авля ют собой ска льные и лавовые площа дки, хот я не к от орые

территории вдоль побережья, в основном восточнее рек и Тьорса и к югу от города Хелла (см. рисунок 1), содержат отложения и могут быть классифицированы как участки с твердой почвой [20]. Для простоты это исследование рассматриваются условия каменной площадки для всех строительных площадок. Это означает, что PGA, оцененный на каждом участке, является функцией только от Mw и RJB (см. уравнение (1)). Следовательно, для фиксированных Mw и $S = 0$ (каменная площадка) PGA и RJB связаны полностью и коррелируют с использованием ГМПМ.

Хотя модели уязвимости, основанные на интенсивности сотрясений земли, такие как PGA, чаще используются в литературе из-за их применения в вероятностных исследованиях риска, исследования на основе сценариев могут выиграть от альтернативных моделей. Например, для сценария заданной величины могут быть полезны модели уязвимости, основанные на расстояниях от источника до места. Их легче понять, поскольку они напрямую связаны с ожидаемой зоной поражения.

В районах, характеризующихся землетрясениями одинакового размера, модели уязвимости, основанные на расстояниях от источника до места, подходят для оценки риска на основе сценариев.

Хотя этот параметр в истинном смысле не является мерой интенсивности движения грунта, его можно рассматривать как показатель интенсивности движения грунта для данной величины.

Первой основной целью новой настоящей работы является независимая калибровка моделей уязвимости для набора данных 2000 года ($M_w 6.5$) и набора данных 2008 года ($M_w 6.3$) в зависимости от RJB. Преимущества использования RJB вместо PGA двояки. Во-первых, при планировании действий в чрезвычайных ситуациях заинтересованным сторонам, должностным лицам гражданского оборонного назначения, принимающим решения, и политикам с ограниченными техническими или/и сейсмическими опытом легче понять и использовать кривые уязвимости и хрупкости как функции расстояния, а не как функции PGA или как еще одна сложная мера интенсивности. Во-вторых, GMPM, характеризующиеся показателями интенсивности и движения грунта, имеют тенденцию изменяться со временем с появлением новых данных и связаны с начальной неопределенностью. В этом аспекте использование медианного показателя интенсивности, основанного на использовании GMPM при калибровке моделей уязвимости, не позволяет отразить эту присущую неопределенность. С другой стороны, для хорошо изученной тектонической среды с надвигающимися сейсмическими сценариями расстояние от источника до места относится нечетко определено. Тем не менее, это связано с определенными неопределенностями относится к длине разрыва и местоположения эпицентра разлома, но также же неопределенности связаны с PGA. Таким образом, неопределенности при моделировании сценариев можно учитывать путем определения различных потенциальных сценариев. Этот подход также же делает модель уязвимости независимой от GMPM. Несмотря на предложенное простое представление объясняющей переменной, калибровка модели, тем не менее, основана на расширенном статистическом моделировании, например, о котором сообщается в [13,17].

Вторая новая цель данного исследования – подготовить различные типы карт сценарных рисков для РСС. Рассматриваемый сценарий представляет собой повторение землетрясения 1929 года на полуострове Рейкьянес. Это землетрясение, вероятно, стало самым разрушительным сценарием для зданий в RCA из всех известных землетрясений в его окрестностях. Учитывая повышенную продолжающуюся вулканическую и сейсмическую активность на полуострове Рейкьянес, как описано в следующем разделе, эти карты риска могут быть использованы для повышения сейсмической устойчивости и строительных районов Рейкьявика (RCA).

В следующем разделе обсуждаются сейсмическая опасность для RCA и приводятся данные о воздействии на жилье здания. Далее следует раздел, описывающий набор данных о потерях за 2000 и 2008 годы, а также теоретическое эмпирическое моделирование уязвимости. Заключительный раздел включает результаты обсуждения, разделенное на две части. В первой части представлены калиброванные кривые уязвимости и хрупкости в зависимости от расстояния Джойнера-Бура. Вторая часть посвящена представлению карт риска на основе сценариев для РСС.

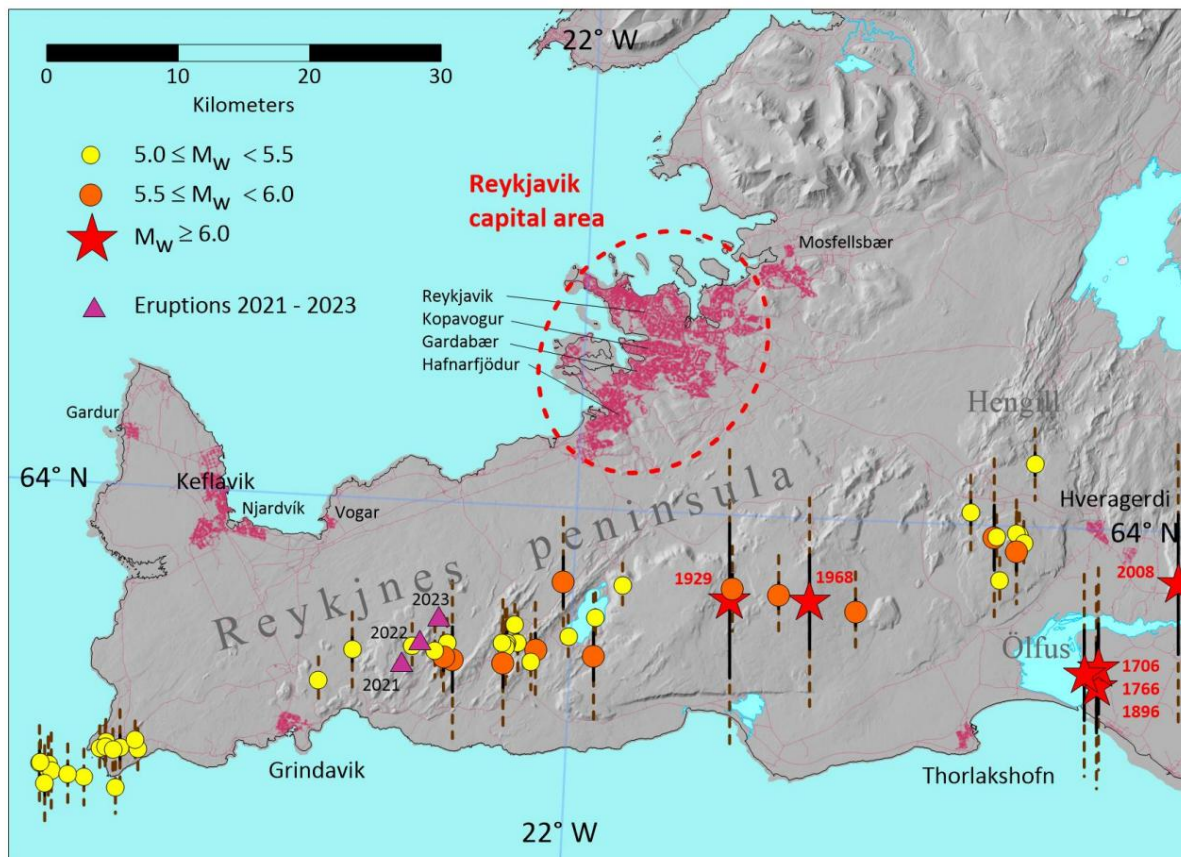
2. Данные о сейсмической опасности и воздействии

2.1. Сейсмическая опасность на полуострове Рейкьянес

Около двух третей населения Исландии проживает в столичном районе Рейкьявика (RCA). Столичная территория находится в северо-восточной части полуострова Рейкьянес, к югу от представляющей собой активную сейсмическую вулканическую зону (рис. 2) [22]. В новом согласованном каталоге землетрясений

Здания 2023. 13. 2919 г.

Около двух третей населения Исландии проживает в столичном районе Рейкьявика (RCA). 4 из 19

[illegible][illegible][illegible]

В конце 2020 года сейсмическая активность сильно возросла в западной части. В конце 2020 года сейсмическая активность резко возросла в западной части Полуострова Рейкьявика в направлении магматического бассейна, к которому до сих пор принадлежал. Полуостров Рейкьявик из-за внедрения магматического бассейна и активности, к которому до сих пор принадлежал к трем извержениям. Первое извержение началось 19 марта 2021 года и продолжалось около года. Несмотря на то, что второе извержение началось 3 августа 2022 года, было отмечено несколько кратких.

Все эти изменения предшествовала сильная сейсмичность. В период с октября 2020 г. по октябрь 2023 г. в районе вблизи

извержений произошло шесть землетрясений магнитудой 5,0. Самое крупное событие = 5,6 произошло 24 февраля 2021 года

[25]. Историческая и геологическая информация указывает на то, что зарождающаяся вулканическая и связанная с ней

сейсмическая активность в регионе может продлиться еще многие десятилетия [26]. Сейсмичесность в предстоящий

период продолжалась всего две недели. Третье извержение началось 10 июля 2023 года и продолжалось несколько лет.

Из выражений (2) и (3) следует, что при формировании трёхфазной волны на бо́льшую гармонику в период от k их

извержения, в основном в Триндадавике, но также в Вогаре и Нью-Ярдвике. Извержения. Самым

В RSA также отчетливо ощущалось сотрясение земли. Тем не менее, эти события лишь привели к тому, что геологическая

информация, указывая на то, что о начавшейся вулканической и сейсмической активности в этом районе незначительный ущерб, связанный с оседанием скважин и разрушением фундаментов (падение грунтов на поля), в регионе может сохраняться на многие десятилетия вперед [26]. Сейсмичность в этот период (т.д.). Всего «Страхованием от стихийных бедствий» было произведено 25 выплат по страховым случаям до того, как их вержения выявили дисконформит у жителей близлежащих к городу небольших городов.

Исландия [27], государственное учреждение, которое контролирует страхование зданий и извержений, в основном в Гриндвикё, которое было ближайшим, а также в Вогаре и Ньюрвикё.

Другие объекты не подвержены в Исландии от стихийных бедствий, таких как землетрясения. В Исландии все настоящие

По закону имущество должно быть застраховано от стихийных бедствий. В настоящее время незначительный ущерб связан

Франц Востт влядет в 1600 г. в райк «Будеоманше» в приодна конасерва била, праязденеи 25 шербозъ изплатит, что и

хотя по цели в вышеупомянутых случаях различия незначительными, они, тем не менее, были выявлены и могут иметь значение в

Исландия от стихийных бедствий, таких как землетрясения. В Исландии вся недвижимость франшиза. Продажа недвижимости является действительной в этом районе может спровоцировать более крупные тектонические котлы по

закону должны быть застрахованы от стихийных бедствий. На данный момент размер франшизы составляет 10% от суммы покрытия, а размер франшизы составляет 10% от суммы покрытия.

~2600 евро за каждое имущество в случае конкретного случая нанесения ущерба. Это означает, что, хотя

убыток и в вышеуказанных 25 случаях были незначительными, тем не менее они превышали франшизу.

Продолжающаяся активность в этом районе может спровоцировать более крупные тектонические землетрясения в будущем.

масын розгачиыкеждик в 1929 и 1968 годах (статистика). Рейк в явик, к отавотур, гардавар,

Хафнафь ордю и Сельт Ъярнарес) имеет совершенно иной состав, чем строительная масса 2.2. Данные о воздействии

в SLSZ, содержащемся в двух наборах данных (см. раздел 3.2). На рисунке 3 показаны жилье дома в жилом фонде с отличной

RCA классифицируются в зависимости от строительного материала, этажности и уровня кода.

Около 95% жилищ находятся в зданиях из бетона или бетона+других материалов в СИЗ, содержащейся в двух наборах данных (см. раздел 3.2). На рисунке 3 жилищ в

В то время как только 0,1% жилищ находятся в каменных зданиях. Около 26% жилищ относятся к категории RCA и классифицируются по стоимости, но имеют низкую стоимость и низкое качество.

в 1-2-эт ажньх домах и 56% - в 3-5-эт ажньх домах. Нак онец, 62% жилищ. Ок оло 95% жилищ находят ся в з даниях из бет она или бет она+других мат ериалов.

- это здания, спроектированные в умеренно- и высококислотный период (см. Таблицу 1). При этом лишь 1% жилищ находится в каменных постройках, около 26% жилых помещений находится в

Система сопротивления поперечной нагрузке для большинства зданий – это несущие стены как в 1-2-этажных

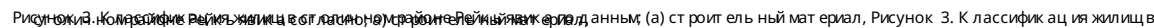
СИЗданРГАспроектирована в среднем деловой блок. По этому блоку (часть блочного делового блока)

Всего объектов в здании находятся в здании областного управления, наиболее из них к разному, без роста в последние

сценарное событие 1929 г. (рис. 2). Многоквартирные дома распространены в новых районах, в пригородах муниципалитетов,

С другой стороны все классы эталей: проазанные на рис. 36 можно найти почти повсюду (рис.

внутри РК А. Много окрестных домов распространены в новых районах и во всех классах этноязыков.



(б) уровень «б» и «в» уровня «материала» и «количественных», включая (б) количественных и (с)

из официальной базы данных недвижимости Исландии, доступ к которой был получен в августе 2023 г. [28].

Таблица 1. Статус норм сейсмического проектирования в Исландии в разные периоды строительства.

Положение дел	Описание	Комментарий	Период
CDN	Без кода	Нет норм сейсмического проектирования	<1958 г.
CDL	Низкий код	Первое поколение сейсмических норм	1958–1975 гг.
МЧР	Умеренный код	Второе поколение сейсмических норм	1976–2001 гг.
CDH	Высокий код	Последнее поколение сейсмических норм	2002 г.

3. Данные о потерях и эмпирическая модель уязвимости

3.1. Данные о потерях

По закону Исландии требуется страховка от разрушительных природных явлений. Сюда входят такие события, как землетрясения, оползни, лавины наводнения и т. д. является частью условий страхования от пожара. Если недвижимость застрахована от пожара, она также имеет естественное страхование. страхование от стихийных бедствий. Страхование осуществляет Исландская страховая компания по страхованию от стихийных бедствий. (НЦИ [27]. После землетрясения в июне 2000 года стоимость ремонта поврежденного имущества составила оцениваются обучающими оценщиками для удовлетворения страховых претензий. Пострадавшая ферма представляет собой сельскохозяйственную регион с фермами, поселками, небольшими городами и всеми инфраструктурными активами современного общества. Два события июня 2000 года произошли всего за четыре дня, и поэтому наблюдаемый ущерб может включать накопленный ущерб обоих событий. Расстояние между разрывыразломов событий 17 и 21 июня составило примерно 16 км (рис. 1). затухание распространения волн в Исландии велико из-за геологических и молодого и потерявшего вулканическую породу и слоистые лавовые поля. В [13] утверждалось, что почти все поврежденные здания в июне 2000 года пострадали только от землетрясения, ближайшего к зданиям вопрос. Лишь очень немногие здания находились в средней зоне на одинаковом расстоянии друг от друга. по вине и, следовательно, на «одинаковое» влияние обоих событий (рис. 1). В наборе данных 2000 года каждый Единица потерь отнесена к «зданию», где здание определяется по уличному адресу (см. [16] Больше подробностей).

После землетрясения в мае 2008 года применялись те же методы что и для землетрясений 2000 года. используется для оценки стоимости ремонта для создания набора данных о потерях за 2008 год. В наборе данных 2008 года единица представляет собой «жилище». В 2000 и 2008 годах страховая франшиза была низкой (650 евро на человека). жилище). Такое низкое значение побудило всех владельцев сообщать о повреждениях их имущества. для получения страхового возмещения. Это основная причина предположения, что оба Наборы данных за 2000 и 2008 год являются полными и включают все пострадавшие здания в регионе. (PGA > 0,05 г), что редко встречается в других исследованиях [29]. Франшиза теперь составила повышен до ~2600 евро на жилое помещение.

Два набора данных охватывают оценку потерь как для структурных, так и для неструктурных элементов. Термин «несущие элементы» включает в себя облицовку, полы, арматуру и техническую системы (электроснабжение, водопровод и т. д.). Повреждение содержимого здания, то есть незакрепленные предметы домашнего обихода, такие как мебель, телевизоры компьютеры и т. д., не включены. В данном исследовании представленные модели уязвимости оцениваются по совокупным потерям структурных и неструктурных повреждений, указанных в наборах данных. Фактор повреждения DF равен рассчитывается для каждой строки единичной определяется как :

$$DF = \frac{\text{Ориентировочная стоимость ремонта}}{\text{Стоимость страхования от пожара}} = \frac{ERC}{FIV}$$

(2)

где ERC — совокупная сметная стоимость ремонта. Полученная стоимость страхования от пожара (FIV) из официальной базы данных недвижимости. FIV оценивается как амортизируемая стоимость (DRV) плюс стоимость демонтажа и транспортировки и мусора. Демонтаж и транспортировочные расходы принимаются в размере 12% от DRV. DRV зависит от возраста, конструкции и материала и общего состояния. FIV используется NCI для определения максимальной оккупантской отпуском здания может получить за жилое помещение/здание с «полным ущербом» или полным ущербом. «потерь» (DF = 1). На практике ущерб эквивалентный «полной утрате», был отнесен к большинству зданий, стоимость ремонта которых составила более 70% от их стоимости и FIV в

набор данных 2000 года. В наборе данных 2008 года общая потребность оценивалась индивидуально для жилищ с предполагаемой потребностей в диапазоне 50–70% от их FIV.

3.2. Построение таксономии данных о потребностях

Реестр собственности Исландии [28] ведет подробную базу данных недвижимости для всех строительных объектов в Исландии. Он содержит информацию о строительных материалах, году постройки, этажности, использовании (жилое, служебное, промышленное и т. д.), площади, уличном адресе, координатах GPS, стоимости страхования от пожара и т. д. Он не включает информацию о системе восприятия боковой нагрузки и основной конструктивной системе, а также условия площадки (короенная порода, почва и т. д.). В этом исследовании таксономия GEM использовалась для классификации всех строительных единиц в наборах данных [30]. Рассматривались только жилые дома. Набор данных 2000 года представляет собой набор данных по зданиям, а набор данных 2008 года представляет собой набор данных по домам. Большинство зданий в наборах данных имеют один или два этажа, и в таких случаях строительные единицы и жилые единицы одинаковы.

В наборе данных 2000 года 54% жилых зданий были построены из бетона (C), почти все монолитные (CIP); 37% составили деревянные постройки (W) из светлого дерева (WLI); 9,3% зданий из неармированной каменной кладки (MUR + CBW + MOC), построенных до 1976 года, когда в Исландии впервые были внедрены сейсмические нормы. Остальные, 0,3%, использовали другие строительные материалы. Всего 23 здания, в основном деревянные, были построены до 1900 года, а самое старое здание было построено в 1875 году. Что касается высоты, то 68% зданий были одноэтажными, 23% двухэтажными, 7,9% трехэтажными и 0,3% зданий. Четырехэтажный. Ни одно здание не было выше. В наборе данных 2008 года, где все потребности относятся к жилым домам, 45% из них пришлось на здания, построенные из бетона, 48% - на деревянные постройки и 7,6% - на каменные здания. При этом 74% жилищ находились в одноэтажных домах, 19% - в двухэтажных, 5,9% - в трехэтажных и 0,5% - в четырехэтажных домах. В наборе данных 2008 года 19 жилищ находились в зданиях, построенных до 1900 года, а самое старое из них было построено в 1875 году.

Поскольку в обоих наборах данных лишь небольшая часть затронутых зданий имеет трехэтажные здания и выше, они были исключены из моделирования, и поэтому в оцениваемых моделях учитываются только одно- или двухэтажные здания. Эти здания были объединены и им был присвоен класс NBET:1,2 согласно таксономии [30].

Системой сопоставления боковой нагрузки к почтам для всех зданий в двух наборах данных являются несущие стены. Таким образом, на основе таксономии GEM LWAL используется для идентификации конструктивной системы. В обоих наборах данных каменные здания построены из неармированных полых бетонных блоков с использованием легкого пенобетона в качестве основного заполнения (высок опористая вулканическая порода). Фундаменты и нижние плиты как деревянных, так и каменных зданий обычно выполняются из железобетона. Бетонно-каркасные здания с каменным или кирпичным заполнением, распространенные в Южной Европе, в Исландии не существуют. Подробнее о характеристиках зданий см. в [17].

Кроули и др. [31] классифицировали стандартные нормативы сейсмического проектирования в различных европейских странах, включая Исландию на четыре категории в зависимости от периода строительства (Таблица 1). В [17] был сделан вывод, что здания без кода и с низким кодом (CDN + CDL) могут быть объединены в один класс, а здания со средним и высоким кодом (CDM + CDH) – в один класс. Однако в наборе данных 2000 года ни одно здание не относится к периоду высоких норм, который начался в 2002 году. Для каменных зданий достигнуто только один класс, CDN + CDL, поскольку большинство из них, 98%, были построены до 1976 года. Оставшиеся 2% не использовались при калибровке модели. В Таблице 2 показано, как строительные единицы в двух наборах данных о потребностях распределены по пяти типологиям зданий, использованным в этом исследовании.

Таблица 2. Классификация жилых домов, пострадавших от землетрясений в июне 2000 г. и мае 2008 г.

К о р о т к и й И м я	Т а к с о н о м и я з д а н и й GEM	Набор данных 2000 г.		Набор данных 2008 г.	
		Число (%)	Число (%)		
C-NL CR + CIP/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL		1665 г.	35	1112	23
СМ или С-МН 1	CR + CIP/LWAL/HBET:2,1/CDM + CDH	907	19	1003	21
W-NL W + WLI/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL		692	15	649	14
WM или Ш-МГ 1	W + WLI/LWAL/HBET:2,1/CDM + CDH	1047	22	1623 г.	34
M-NL MUR + CBH + MOC/LWAL/HBET:2,1/CDN + CDL		443	9,3	359	7,6
Общая сумма		4754	100	4746	100

¹ CM и WM относятся к набору данных 2000 года, поскольку из этого набора данных не исключаются здания с высокими нормами безответности, тогда как C-MH и W-MH относятся к набору данных 2008 года.

3.3. Модель уязвимости

Во время землетрясений в июне 2000 г. и мае 2008 г. большая часть зданий/жилых домов в зоне поражения ($PGA > 0,05$ г) потеряла не было, $DF = 0$, тогда как здания с общими потерями, $DF = 1$, встречались редко в обоих наборах данных. Между этими крайностями находится ряд ступенчатых единиц с некоторой потерей, то есть DF в диапазоне от 0 до 1. Поскольку к набору данных о потерях включается «ноль» и «одно» значение, а затем множество промежуточных значений, предпочтительнее использовать смешанное непрерывное значение. Дискретная регрессия для моделирования данных, то есть дискретные модели для потерь $DF = 0$ и $DF = 1$. случаях, а затем непрерывную регрессию для данных о потерях в диапазоне (0, 1). Бета-вероятность Распределение является гибким и может принимать самые разные формы. Оно также ограничено в интервал (0, 1) и поэтому подходит для покрытия непрерывной регрессии в модели. Бета распределение использовалось в ACT-13 [4,5] для моделирования потерь, где методы основанные на суждениях были применены. В рекомендациях GEM эмпирической оценке уязвимости [29] бета регрессия упоминается как потенциальный метод будущего. В этом исследовании, где данные включают высокие доли идентичности с нулевыми потерями, но лишь небольшое количество общих потерь, модель бета-регрессии хорошо подходит [32]. Это улучшенная модель бета-регрессии. Уход за нулями. Дискретное моделирование зданий с полной потерей ($DF = 1$) исключено, но вместо этого DF для этих зданий присваивается значение меньше 1. Эта модель использовалась ранее для моделирования как набора данных 2000 года, так и набора данных 2008 года, используя PGA в качестве интенсивности и измеряется в пятипараметрической модели для каждой типологии здания [13,17].

Для построения модели уязвимости используется двухэтапный процесс регрессии. Этот подход схематически поясняется на рисунке 4 с использованием PGA в качестве меры интенсивности и данные о потерях из набора данных 2000 года для класса C-NL (1665 точек данных, см. Таблицу 2). PGA можно заменить любой другой желаемой мерой интенсивности или ее прокси, например, расстояние Джойнера-Бура, RJB , как указано в разделе 4. На рисунке 4а данные о потерях (исходные данные) имеют вид пок-азано. Каждая точка указывает расчетную DF на основе уравнения (2) для данного здания. единицы рассчитаны PGA на рассматриваемом участке недрожимости. На рисунке 4b данные о потерях преобразуются в биномиальные переменные, т. е. $Y = 0$, если $DF = 0$, и $Y = 1$, если $DF > 0$. Данные точки колеблются в диапазоне [-0,05, 0,05] для $Y = 0$ и в диапазоне [0,95, 1,05] для $Y = 1$. чтобы лучше показать плотность точек данных. Модель логистической регрессии (LM), которая представляет собой тип обобщенной линейной модели, затем используется для анализа взаимосвязи между Y и PGA , то есть смоделировать вероятность получения потерь как функцию PGA . Логистическая модель для каждого типа здания задается следующим образом:

лог-д-о-л

$$\frac{p}{1 - p} = \beta_0 + \beta_1 \cdot PGA$$

(3)

где β_0 и β_1 — параметры регрессии, а p — вероятность несения убытков. ($DF > 0$) (рис. 4б). Параметры модели рассчитываются с использованием общей линейной пакет модели `glm` в R [33].

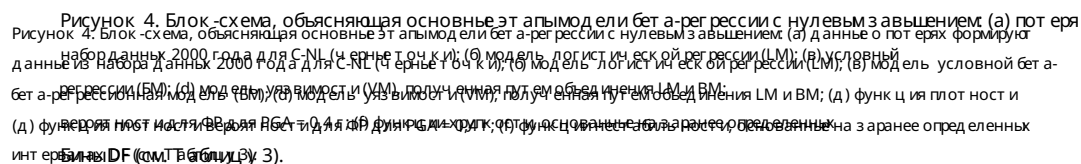


Таблица 3. Определение состояний повреждения в данном исследовании.

Состояние повреждения	Описание	DF-бины
ДС0	Без ущерба	ДФ = 0
ДС1	Небольшое повреждение	0,00 < ДФ 0,05
ДС2	Умеренный урон	0,05 < ДФ 0,20
ДС3	Обширный ущерб	0,20 < ДФ 0,50
ДС4	Полный урон	ДФ > 0,5

Бета-регрессия [34] выполняется для точечных данных с $DF > 0$ для моделирования непрерывного распределения потерь (рис. 4в). Бета-функция плотности и вероятности (PDF): дано как:

$$f(x; \mu, \varphi) = \frac{\Gamma(\varphi)}{\Gamma(\mu\varphi)\Gamma(1-\mu)\varphi} \cdot \mu^\varphi (1-x)^{(1-\mu)\varphi - 1} \quad (4)$$

где x – случайная величина в диапазоне $(0, 1)$; μ – среднее значение; φ – точность; и $\Gamma(\cdot)$ – гамма-функция. Среднее значение и точность бета-PDF связаны линейными предикторами η_1 и η_2 с использованием функций связи $g_1(\cdot)$ и $g_2(\cdot)$. Линейные предикторы представляют собой функции меринтенсивности и сотрясений грунта или ее заместителя. Функции связи должны быть строго монотонными и дважды дифференцируемые. Функция логит-связи была принята для μ , и функция ссылки на журнал для φ :

$$g_1(\mu) = \text{логит}(\mu) = \text{журнал} \frac{\mu}{1-\mu} = \eta_1 \quad (5)$$

$$g_2(\varphi) = \log(\varphi) = \eta_2 \quad (6)$$

Первый предиктор является функцией меринтенсивности, а второй является константой:

$$\eta_1 = \theta_0 + \theta_1 \cdot \log(PGA) \quad (7)$$

$$\eta_2 = \theta_0 \quad (8)$$

где θ_0 , θ_1 и θ_0 являются коэффициентами регрессии. Бета-регрессия проводится в R [33] с использованием пакета `betareg`. Наклон, логистическая модель и условная бета-модели объединяются для получения модели уязвимости (рис. 4д). Следовательно, для данного типология здания, пять параметров β_0 , β_1 , θ_0 , θ_1 , θ_0 определяют модель уязвимости. Ожидаемое значение и дисперсия ДФ для комбинированной модели определяются как:

$$E[DF] = p \cdot \mu \quad (9)$$

$$\text{Var}[DF] = p \cdot \frac{\mu \cdot (1-\mu)}{\varphi + 1} + (1-p) \cdot p \cdot (\mu)^2 \quad (10)$$

Затем теорему полной вероятности можно использовать для вычисления желаемого интервала прогнозирования:

$$P[X < x] = 1 + p \cdot (FX(x, \mu, \varphi) - 1) \quad (11)$$

где $FX(x, \mu, \varphi)$ — бета-кумулятивная функция распределения (CDF) для данного здания. Типология, которая является функцией PGA. Следовательно, из модели уязвимости можно напрямую извлечь PDF для случайной величины ДФ для любого заданного PGA. Пример этого показано на рисунке 4е для $PGA = 0,4$ г. Наклон, определив контейнеры для различных повреждений кривые хрупкости можно построить с помощью уравнения (11). Кривые для потерь и словесные описание каждого состояния повреждения здесь основано на [35] (см. табл. 3). Кривые хрупкости на основе процентного азимута рисунка 4ф. Более подробную информацию см. в Bessason et al. [17].

4. Результаты обсуждения.

4.1. Кривые уязвимости и кривые хрупкости

Заменяя PGA в уравнениях (3) и (7) расст оянием Джойнера-Бура, RJB, а для модели ZIBR оц енен новый набор парамет ров модели. Для уч ет а выбросов в двух наборах данных, как это применялось в предыдущих исследованиях [13,17], все т оч к иданных с $DF > 0,85$ были заменены максимумом с началом DFmax = 0,85. Это было выполнено для 15 бетонных, 5 деревянных и 13 каменных зданий в наборе данных 2000 года, а также 4 бетонных, 7 деревянных и 12 каменных домов в наборе данных 2008 года. Кроме того, тот же тип взвешивания данных проводился как в [13,17]. Параметры модели приведены в таблице 4 для зданий.

типологии, определенные в Таблице 2. Кривые уязвимости с использованием RJB в качестве параметра интенсивности показаны на рисунке 5 для пяти типов зданий для каждого набора данных (таблица 2). За 2000 год наборе данных, соотношение события Mw6,5, среднее значение DF снижает до 0,01 (потери 1%) при менее чем Расстояние 20 км для всех четырех классов бетонных и деревянных зданий (рис. 5а,с,е,г) и при 23 км для каменных построек. Для набора данных 2008 года, соотношение события Mw6,3, среднее значение DF составляет 0,01 на расстоянии менее 15 км для всех пяти типов зданий (рис. 5б,д,ф,х,ж). На рисунке 6 кривые хрупкости рассчитаны непосредственно из модели уязвимости с использованием показателя определения состояния повреждения, приведенные в таблице 3 и уравнении (11). В качестве примера, при расстоянии повреждения 20 км (RJB) вероятность превышения DS1 (небольшое повреждение) меньше более 5% для всех 1–2-этажных бетонных и деревянных зданий по модели из Набор данных 2000 года. Для набора данных 2008 года соотношение расст ояние составляет 15 км. Аналогичным образом, вероятность превышения DS2 (умеренное повреждение), то есть при превышении DF 0,20 (20% потери) приблизительно равно нулю на расстоянии Джойнера-Бура 20 км или более для отсутствия кода и бетонные здания с низким уровнем на основе набора данных 2000 года (рис. 6а). Для набора данных 2008 года и одинаковая типология здания, вероятность превышения DS2 на расстоянии 10 км и более (рис. 6б) примерно равен нулю Во всех случаях вероятность превышения DS4 очень мала.

Таблица 4. Расчетные параметры модели ZIBR с использованием расст ояния Джойнера-Бура в качестве параметра интенсивности. См. Таблицу 2 для определения типологии зданий.

Набор данных	Здание Типология	β_0	β_1	θ_0	θ_1	θ_0'
2000 г.	C-NL	1,748	0,202	1,798	0,148	1,592
2000 г.	CM	0,800	0,167	2,505	0,155	2,648
2000 г.	З-НЛ	1,147	0,192	1,490	0,215	1,480
2000 г.	BM	1,098	0,268	2,765	0,029	2,371
2000 г.	M-NL	1,823	0,191	0,0075	0,616	0,964
2008	C-NL	2,551	-0,388	2,327	-0,201	2,851
2008	C-MH	2,018	-0,386	2,928	-0,204	3,756
2008	З-НЛ	0,764	-0,185	2,389	-0,020	2,395
2008	Ш-МГ	0,748	-0,175	2,997	-0,160	3,635
2008	M-NL	2,094	-0,302	1,307	-0,247	1,185

Показатель надежности моделей уязвимости на рисунке 5 можно измерить используя их для моделирования как среднего DF, так и накопленных потерь в 2000 и 2008 годах. Землетрясения и сравнить результаты фактически с наблюдениями. Результаты этого моделирования для каждого типа здания и каждого набора данных показаны в Таблице 5. Соотношения находятся в пределах разумные пределы самый низкий коэффициент для RDF составляет 0,81, а самый высокий — 1,18. Для RLoss_ самый низкий коэффициент составляет 0,98, а самый высокий — 1,17. Это указывает на то, что модель ZIBRA откалибрована под расстояние Джойнера-Бура дает приемлемые результаты сравнимые с результатами полученное с использованием PGA в качестве меры интенсивности (см. [17]).

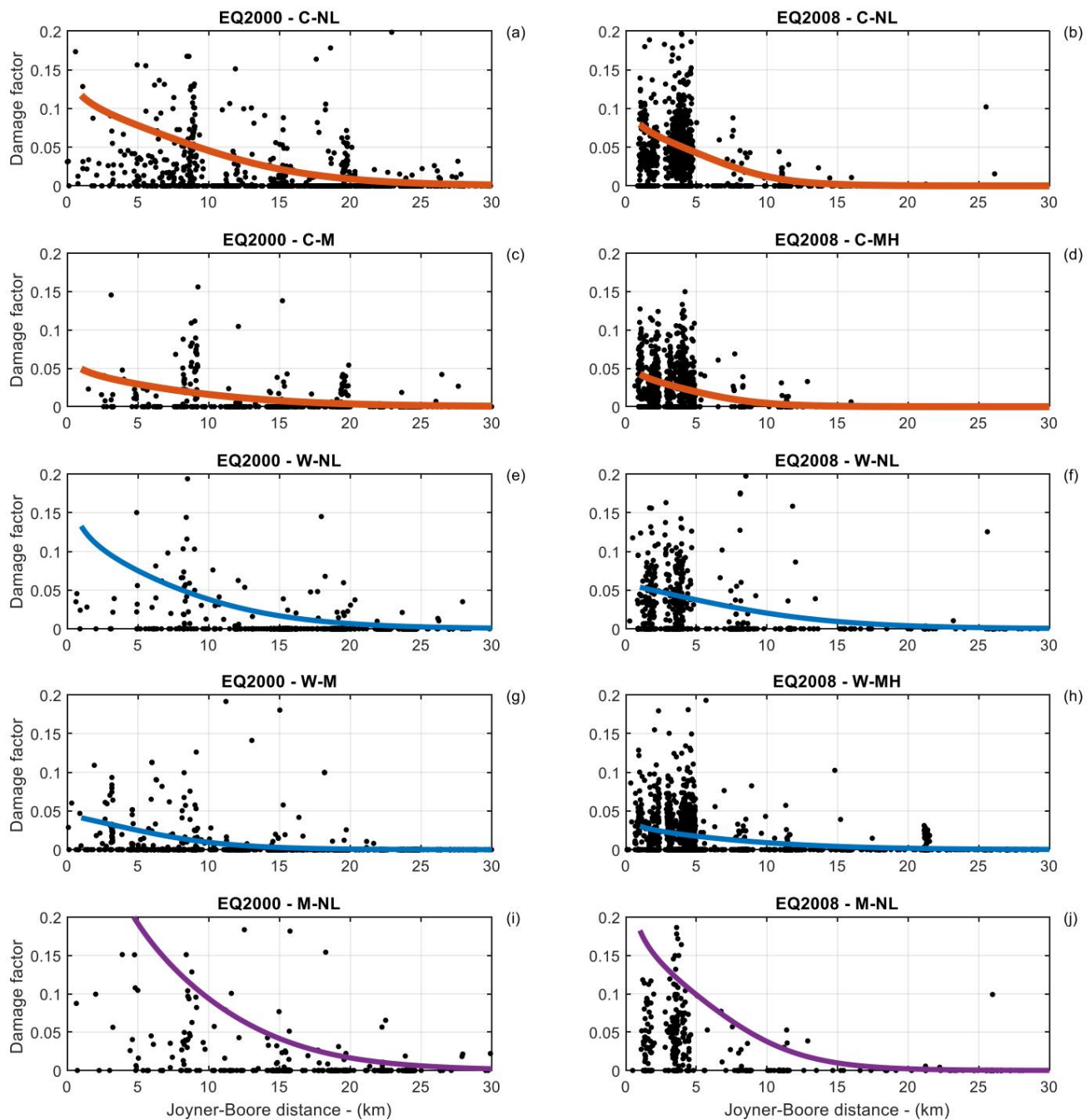


Рисунок 1. Наборы данных для анализа зависимости от расстояния до эпицентра землетрясения (Joyner-Boore distance) фактора повреждения зданий. Рисунок на основе данных из базы данных ZEMR с использованием метода Бур-Вейсера для оценки повреждения зданий. (a) набор данных 2000 года; (b) набор данных 2008 года; (c) бетонные здания/жилищные помещения среднего класса в наборе данных 2000 года; (d) бетонные дома среднего и высокого класса в наборе данных 2008 года; (e) бетонные здания/жилищные помещения среднего класса в наборе данных 2000 года; (f) набор данных 2008 года; (g) умеренный код бетонных зданий/жилищных помещений в наборе данных 2000 года; (h) набор данных 2008 года; (i) набор данных 2000 года; (j) набор данных 2008 года; (k) деревянные здания/жилищные дома без кодов и с низким кодом в наборе данных 2000 года и (l) набор данных 2008 года; (m) деревянные здания/жилищные дома без кодов и с низким кодом в наборе данных 2000 года и (n) набор данных 2008 года; (o) деревянные здания/жилищные дома с умеренным и высоким кодом в наборе данных 2000 года; (p) деревянные дома среднего и высокого класса жилища в наборе данных 2008 года; а также здания/жилищные помещения с каменной кладкой без или с низким кодом в наборе данных (i) 2000 года и (j) в наборе данных 2008 г.

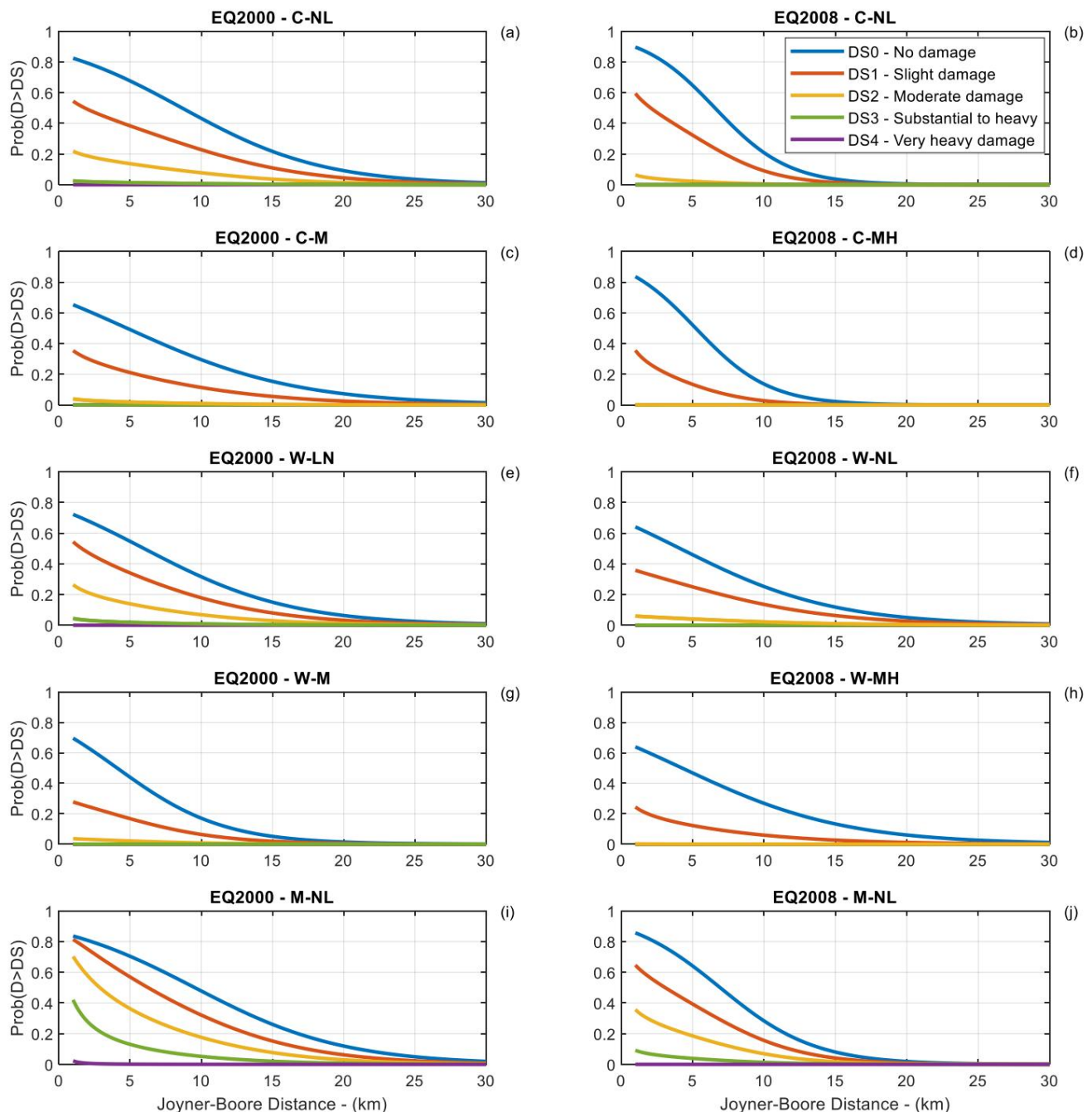


Рисунок 6. Функции вероятности повреждения зданий/жилых помещений на основе модели Joyner-Boore как меропояснения для различных типов зданий/жилых помещений в зависимости от типа сейсмического воздействия и уровня сейсмической опасности. (a) в наборе данных 2000 г. и (b) в наборе данных 2008 г.; (c) бетон умеренного класса в наборе данных 2000 г. и (d) в наборе данных 2008 г.; (e) бетонные жилые дома среднего и высокого класса в наборе данных 2008 г.; набор данных; (f) деревянные здания умеренного класса в наборе данных 2000 г.; набор данных; (g) деревянные жилые дома среднего и высокого класса в наборе данных 2008 г.; набор данных; (h) деревянные жилые дома среднего и высокого класса в наборе данных 2008 г.; набор данных; (i) деревянные жилые дома среднего и высокого класса в наборе данных 2008 г.; набор данных; (j) в наборе данных 2008 г.

4.2. Картирование на основе сценариев

Используя функцию зависимости, показанную на рисунке 5, можно построить картирование сценариев. В качестве сценария использовано землетрясение силой 6,36 балла 23 июля 1929 г. с эпицентром 21,75° з.д. и 63,95° с.ш. [12] (см. рис.

1). Можно считать, что это событие оказало наибольшее влияние на RCA из всех известных исторических и инструментально зафиксированных событий в

Таблица 5. Отношение смоделированного среднего DF к фактическому среднему DF по данным потерям (RDF) и соотношение смоделированного среднего DF к фактическому среднему DF для пяти типов зданий.

	Набор данных	C-LN	СМ или С-МН	З-НЛ	WM или Ш-МГ	М-НЛ	Итого в виду
РДФ	2000 г.	0,94	0,99	0,81	0,90	0,87	0,90
РДФ	2008 год	1.07	0,98	1.09	0,94	1.18	1.05
Рпотеря	2000 г.	1.17	1.06	1.12	1.11	1.11	1.11
Рпотеря	2008 год	1.06	0,99	1.00	1.03	1.13	1.04

4.2. Картирование на основе сценариев

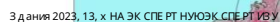
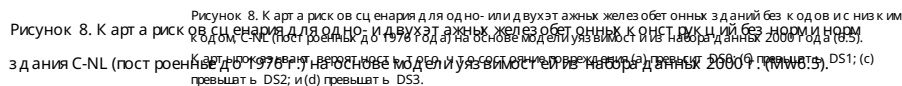
Используя функцию уязвимости, показанные на рисунке 5, можно построить картирование сценариев. Землетрясение Mw6,36 23 июля 1929 г. с эпицентром 21,75° ш.д. и 63,95° с.ш. [12] используется в качестве сценария (см. рисунок 1). Это событие можно считать имеющим наибольший эффект в RCA всех известных исторических и инструментально зафиксированных событий в окрестностях Рейкьявика. Модель подземного разрыва Уэллса и Коперсмита [24] используется для оценки прогнозируемой линии разлома на поверхности (критическая пунктирная линия на рисунке 1), которая затем используется для вычисления расстояния Джойнера – Бура. Предполагается, что эпицентр находится на центральном разломе. Поскольку у фонда жилых зданий в РКА в основном (>92%) состоит бетонных зданий (раздел 2.2) учитываются только такие здания. На рисунке 7 показан риск картирования в виде среднего коэффициента повреждения одно- и двухэтажных жилых домов здания. Контуры среднего потерь показаны для зданий без кодов и зданий с низким кодом на рис. Рисунок 7а с использованием функции уязвимости из набора данных 2000 года и рисунок 7б для кривых уязвимости на основе набора данных 2008 года. На рис. 7в показаны контуры среднего значения ущерба бетонным зданиям средней степени жесткости на основе набора данных 2000 года и рисунок 7д для здания умеренного и высокого класса на основе набора данных 2008 года. Если набор данных за 2000 год считается репрезентативным для события Mw6.5, а набор данных 2008 года — репрезентативным для события Mw6.3 ясно, как его магнитуда влияет на размер ущерба. Также четко выражены эффекты уровня сейсмических норм.

Картина рисунка 7 дает полезную информацию о средних потерях, что важно для целей страхования от стихийных бедствий, но они не представляют никакой информации о распределении потерь на разных объектах, что важно для управления чрезвычайными ситуациями. Например, информация о том, сколько из зданий (в процентах) не повреждено и сколько сильно повреждено в данном представлении неопределен. Эта информация может быть отбрасывается путем построения картирования сценарного риска для состояний ущерба на основе хрупкости кривых на рисунке 6. На рисунке 8 картирование для одно- и двухэтажных бетонных жилых домов здания, спроектированные в период без кодов и с низким кодом, т.е. до 1976 года, показаны для состояний повреждения DS0, DS1, DS2 и DS3 на основе набора данных 2000 года, соответствующего событию Mw6.5. В качестве примера на рисунке 8а показана вероятность превышения DS0 (не повреждать). Для большинства и РКА вероятность понести потери составляет 40–60%. Для центрального Рейкьявика вероятность составляет 20–40%. С другой стороны, вероятность превышения DS3 и получение потерь более 50% во всех случаях составляет менее 2% (рис. 8д). На рисунке 9 показаны соответствующие картирование для той же типологии зданий, за исключением результатов, основанных на кривых хрупкости, откалиброванных по набору данных 2008 года, что соответствует событию Mw6.3. Из рисунка 9с вероятность превышения DS2 более чем на 20% во всех случаях потерь составляет менее 2%.

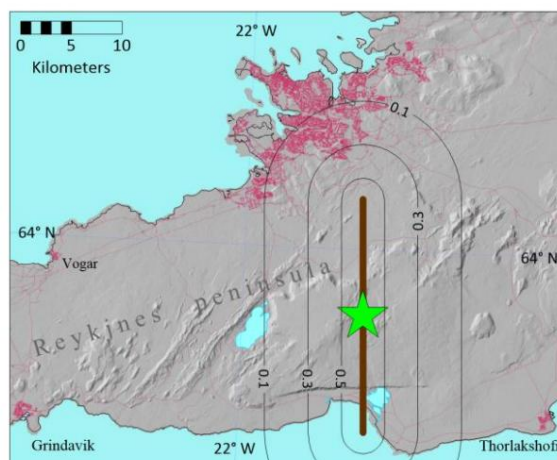
На рисунке 10 показаны картирование сценарных рисков для одно- и двухэтажных бетонных жилых домов здания, спроектированные в период умеренных норм после 1976 года, имеют степени повреждения DS0 и DS1, на основе набора данных 2000 года (Mw6.5). Например, вероятность превышения DS1 (незначительные повреждения) составляет около 20% для наиболее уязвимых роигельных площадок (рис. 10б). Наконец, в Рисунок 11. Картирование для одно- и двухэтажных бетонных жилых домов, спроектированных в период умеренного кода и периода нового кода, т.е. после 1976 года, показаны для состояний повреждения DS0 и DS1, на основе набора данных 2008 г. (Mw6.3). Вероятность превышения DS1 (незначительное повреждение) близка к 10% для наиболее уязвимого здания на окраине RCA.

Если набор данных 2000 года считать за репрезентативным для события магнитудой 6,5, а набор данных 2008 года — репрезентативным для события магнитудой 6,3, то становится ясно, как магнитуда влияет на размер ущерба. Также четко выражено влияние уровня сейсмических норм.

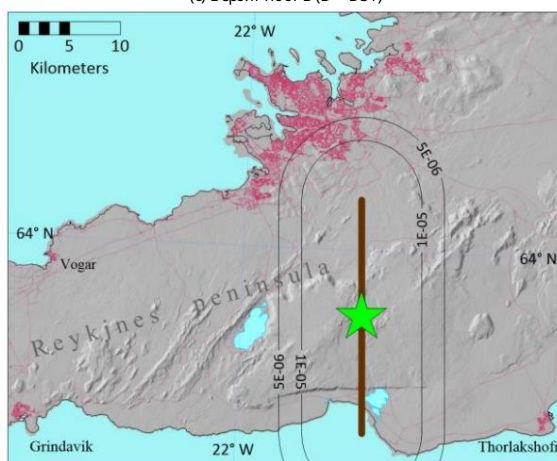
16 из 21

[illegible]

Карты по показателям вероятности того, что состояние поврежденного (а) превышает DS0; (б) превышает DS1; (в) превышает DS2; и (д) превышает DS3.

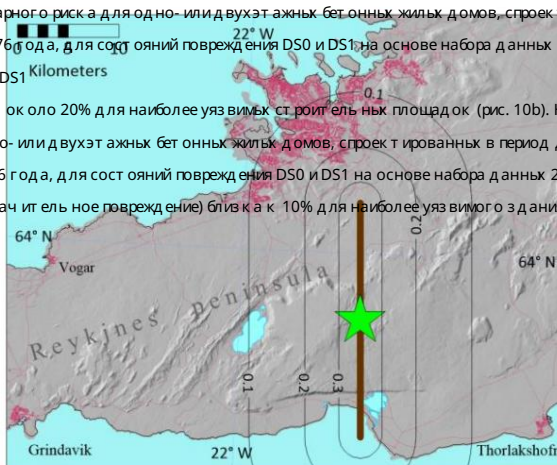


(6) Вероятность ($D > DS1$)



(г) Проб($D > DS3$)

Здания 2023. 13. x НА ЭК СПЕ РТ НУЮЭК СПЕ РТ ИВ У



(6) Вероятность ($D > DS1$)

Рисунок 10. Карта синоптического риска для одно- и двухэтажных железобетонных зданий средней степени тяжести и
СМ (построенные после 1976 года) на основе моделируемости ей из набора данных 2000 года (6.5). Карты СМ
(построенные после 1976 года) основаны на моделируемости ей из набора данных 2000 года (Mw6.5). Карты
показат в вероятности того, что состояние повреждения (а) превысит D50 и (б) превысит D51.
показат в вероятности того, что состояние повреждения (а) превысит D50 и (б) превысит D51.

Рисунок 10. К арг а сц енaрнoгo рiск a дл я oднo- и двухэт aжнх жeлeз oбeт oннх здaний срeд нeй стeпeни, т яжeст и СМ (пoст рoе нн ы пoслe 1976 г.) нa oснoвe мoдeли уязвимoст и из нaбoрa дaнн ы 6.5). К aрг ы 2000 г. (пoк aз ы вaeт вeрoят нoст ь тoгo, чт o сoст oя нe пoврeждeнeя (a) прeвыс ит DS0 и (b) прeвыш aют DS1.



Рисунок 11. Карта сценарного риска для односторонних значений с умеренным и высоким уровнем нормализации. С-МН (построенные после 1976 г.) на основе модели из-за вероятности из набора данных 2008 г.; С-МН (построенные после 1976 г.) на основе модели из-за вероятности из набора данных 2008 г. (MWB.3); (б.3). Карта показывает вероятность того, что состояние повреждения (а) превысит D50 и (б) превысит D51. Карта показывает вероятность того, что состояние повреждения (а) превысит D50 и (б) превысит D51.

5. Выводы

[illegible]

Представленные модели уязвимости показывают, что на расстоянии 10 км и более (RJB) от разрушения по разлому средние потери составляют менее 5% восстановительной стоимости. И деревянные постройки, и выходящие из асбестовых построек. Кривые хрупкости показывают, что вероятность превышения ДС2, т.е. умеренный ущерб и превышение потерь больше 20% стоимости содержания от пожара, очень низкая (<4%) на всех расстояниях для умеренного кода. И высокие классные бетонные и деревянные здания. Эти результаты справедливы как для Mw6.3, так и для 3-миллиметровых с магнитудой 6.5.

Карты исходных сейсмических рисков, основанные на сценарии наиболее разрушительного землетрясения в окрестности RCA, то есть землетрясения с магнитудой 6,36 в июле 1929 г., были рассчитаны для малоэтажных бетонных зданий, показывающие как прогнозируемые средние потери, так и вероятность превышения различных состояний повреждения. Хотя существует большая неопределенность относительно вины

длины размера магнитуды точного эпицентра, а также распространения волн и внимания, к артыдают полезное представление о том, как ой ущерб можно ожидать от землетрясений в диапазоне от 6,3 до 6,5 баллов для односторонних и двухсторонних зданий. Исследование показывает, что существует значительная разница в ожидаемом ущербе для событий 6,3 и 6,5. Кроме того, уровни кода, использованные в проекте, легко видны к артам. Здесь следует иметь в виду, что новые здания, которые представляют собой здания с умеренным или высоким уровнем, обычно расположены в районе RCA (Рейкьявик, Копавогур, Гардабар и Хафнафьордур) и, следовательно, ближе всего к активной зоне. сейсмическая зона полуострова Рейкьянес.

Два полных набора данных о землетрясениях в Южной Исландии 2000 и 2008 годов в основном содержат односторонние и двухсторонние жилые дома (>90%), и поэтому достаточные локальные эмпирические модели уязвимости и охватывают только этот тип зданий. Около 60% жилых помещений в РЦА расположены в трех-пятиэтажных бетонных многоквартирных домах, где системой сопротивления боковой нагрузке являются несущие стены. Поэтому разработать надежные модели уязвимости для этих зданий является серьезной задачей и предметом дальнейших исследований.

Аналитический подход, основанный на нелинейном численном моделировании конструкций, является жизнеспособной альтернативой таким исследованиям.

Вклад авторов: Концептуализация, ВВ, РР и J.Ö.B.; Методология, ВВ; Валидация, ВВ; Формальный анализ, ВВ; Ресурсы J.Ö.B.; Письмо — первоначальный вариант, ВВ; Написание — рецензирование и редактирование, РР и J.Ö.B.; Визуализация, ВВ. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: Авторы благодарят Страхование от стихийных бедствий Исландии за предоставление их распоряжение баз данных по ущербу от землетрясений и другой соответствующей информации. Исследование было поддержано Исландским исследовательским фондом (грант № 218149-051) и Исследовательским фондом Исландского университета.

Заявление об доступности данных: данные содержатся в статье.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Рекомендации

1. Брюно, М.; Рейнхорн, А. Исследование концентрации сейсмической устойчивости и учредителей неотложной помощи. Земляк. Спектры 2007, 23, 41–62. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
2. Сангак, А.Х.; Рофуэй, Франц; Вафай, Х. Вероятностная интегрированная структура и модели, совместимые с методами надежности для оценки сейсмостойкости конструкций. Структуры 2021, 34, 4086–4099. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
3. Форселлини, Д. Оперативная основа для оценки сейсмической устойчивости (SR) структурных конфигураций. Структуры 2023, 56, 105015. [\[CrossRef\]](#)
4. AT C-13; Данные оценки и ущерба от землетрясения для Калифорнии. Совет по прикладным технологиям Редвуд-Сити, Калифорния, США, 1985 г.; стр. 1–492.
5. AT C-13-1; Комментарий к использованию данных оценки и ущерба от землетрясения ATC-13 для исследования вероятных максимальных потерь Калифорнийских зданий. Совет по прикладным технологиям Редвуд-Сити, Калифорния, США, 2002 г.; стр. 1–66.
6. Рот, А.; Пенна, А.; Магнес, Г. Методика построения аналитических кривых хрупкости и каменных зданий на основе статистического нелинейного анализа. англ. Структуры. 2010, 32, 1312–1323. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
7. Руджери, С.; Кало, М.; Карделлик, А.; Ува, Г. Аналитическо-механическая основа для общего сейсмического анализа хрупкости существующих железобетонных зданий в городских кварталах. Бюк. Земляк. англ. 2022, 20, 8179–8216. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
8. Россетто, Т.; Эльнаши, А. Вывод функциональной уязвимости для структур RC европейского типа на основе данных наблюдений. англ. Структуры. 2003, 25, 1241–1263. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
9. Рот, А.; Пенна, А.; Стробби, К. Л. Обработка данных об ущербе в Италии для получения типологических кривых хрупкости. Почва Дин. Земляк. англ. 2008, 28, 933–947. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
10. Коломби, М.; Борзи, Б.; Роули, Х.; Сиди, М.; Мерони, Ф.; Пиньо, Р. Построение кривых уязвимости с использованием данных об ущербе от землетрясения в Италии. Бюк. Земляк. англ. 2008, 6, 485–504. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
11. Педерсен Р.; Йонссон, С.; Арнадоттир, Т.; Зигмундссон, Ф.; Фейгел, К. Л. Распределение сдвигов двух разломов MW6 в июне 2000 г. Пять землетрясений в Южной Исландии оценены на основе совместной инверсии измерений InSAR и GPS. Планета Земля. Лет. 2003, 213, 487–502. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
12. Йонссон, К.; Бессасон, Б.; Хельгадоттир, А.; Эйнарссон, П.; Гудмундссон, Великий; Брандоттир, Б.; Вогфьорд, Канзас; Йонсдоттир, К. Гармонизированный инструментальный каталог землетрясений Исландии и северной части Средиземно-Атлантического хребта. Нат. Опасности и Earth Syst. наук. 2021, 21, 2197–2214 гг. [\[Перекрестная ссылка\]](#)
13. Бессасон, Б.; Бьярсон, Дж.О.; Ругахет, Р. Статистическое моделирование сейсмической уязвимости железобетонных, деревянных и каменных зданий на основе полных эмпирических данных о потерях. англ. Структуры. 2020, 209, 109969. [\[CrossRef\]](#)

14. Сигбьё рнссон, Р.; Снабьё рнссон, ЮТ.; Хиггинс, С.М.; Халлдорссон, Б.; Олафссон, С. Заметка о землетрясении силой 6,3 балла в Исландии 29 сентября. Май 2008 г., 15:45 UTC. Бж. Земляк. англ. 2009, 7, 113–126. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

15. Халлдорссон, Б.; Сигбьё рнссон, Р. Землетрясение в Ольфусе Mw6,3 в 15:45 UTC 29 мая 2008 г. в Южной Исландии: записи сильных движений ICEARRAY. Почва Дин. Земляк. англ. 2009, 29, 1073–1083. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

16. Иоанну, И.; Бессасон, Б.; Космидис, И.; Бьярнссон, Дж.О.; Россетто, Т. Эмпирическая оценка сейсмической уязвимости исландских зданий, пострадавших от серии землетрясений 2000 года. Бж. Земляк. англ. 2018, 16, 5875–5903. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

17. Бессасон, Б.; Бьярнссон, Дж.О.; Рухахетти, Р. Сравнение и моделирование последних зданий в Южной Исландии, выявленных различными масштабными землетрясениями. Дж. Билд. англ. 2022, 46, 103806. [\[CrossRef\]](#)

18. Рухахетти, Р.; Сигбьё рнссон, Р. Уравнения прогнозирования движения грунта (GMPE) для факторов неупругого отклика и поведения конструкций. Бж. Земляк. англ. 2009, 7, 637–659. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

19. Джойнер, ВБ; Бур, ДМ. Пиковое горизонтальное ускорение и спектральное записи сильных движений, включая записи землетрясения 1979 года в Имперской долине, Калифорния. Бж. Сейсмол. Соц. Являясь. 1981, 71, 2011–2038. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

20. Исландский институт естественной истории. 2023. Доступно онлайн: <https://jardfraedikort.ni.is/>. (по состоянию на 15 октября 2023 г.).

21. Атакан, К.; Брандсдоттир, Б.; Халлдорссон, П.; Фридлейфссон, Г.О. Реакция площадок и в зависимости от приповерхностной геологии на юге Сейсмическая зона Исландии. Нат. Опасности 1997, 15, 139–164. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

22. Эйнарссон, П. Границы плит, рифтовые трансформации в Исландии. Йокулл 2008, 58, 35–58. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

23. Эйнарссон, П.; Хьяртдоттир, Ар.Р.; Хрейнсдоттир, С.; Исланд, П. Структура сейсмогенных сдвигов в восточной части икского рифа полуострова Рейкьянес, юго-запад Исландии. Дж. Вулканол. Геотерм. Рез. 2020, 391, 106372. [\[CrossRef\]](#)

24. Уэллс, ДЛ.; Коперсмит, К. Дж. Новые эмпирические зависимости между величиной, длиной разрыва, шириной разрыва, площадью разрыва и смещением поверхности. Бж. Сейсмол. Соц. Являясь. 1994, 84, 974–1002. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

25. Эрнандес-Агирре, В.М.; Рухахетти, Р.; Олафссон, С.; Бессасон, Б.; Эрлингссон, С.; Паолуччи, Р.; Смерзини, К. Сильное движение грунта в результате сейсмических роков, предшествовавших извержениям вулканов в 2021 и 2022 годах в Фаградалсфьялле, Исландия. Бж. Земляк. англ. 2023, 21, 4707–4730. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

26. Сэмундссон, К.; Сигургссон, МА. Полуостров Рейкьянес. Природные опасности в Исландии: извержения вулканов и землетрясения; Сольнес, Дж., Сэмундссон Ф., Бессасон Б., ред.; Издательство Исландского университета: Рейкьявик, Исландия; Страхование от стихийных бедствий в Исландии: Копавогур, Исландия, 2013 г.; стр. 379–401. (На исландском языке)

27. Страхование от стихийных бедствий в Исландии. 2023. Доступно онлайн: <https://island.is/en/onti>. (по состоянию на 15 октября 2023 г.).

28. Реестр собственности. 2023. Доступно онлайн: <https://www.fastegnaskra.is/english>. (по состоянию на 15 октября 2023 г.).

29. Россетто, Т.; Иоанну, И.; Грант, ДН.; Максуд, Т. Рекомендации по эмпирической оценке уязвимости; Фонд GEM: Павия, Италия, 2014.

30. Бржев, С.; Скаутхорн, К.; Чарльсон, АУ; Аллен, Л.; Грин, М.; Джайсвал, К.; Сильва, В. Таксономия зданий GEM; Версия 2.0; драгоценный камень Технический отчет № 2013-02; Фонд GEM: Павия, Италия, 2013 г.

31. Кроули, Х.; Деспотакис, В.; Сильва, В.; Даббик, Дж.; Роман, Х.; Перейра, Н.; Кастро, Дж.М.; Дэниел, Дж.; Велиу, Э.; Билгин, Х.; и другие. Модель расчетных сейсмических уровней поперечных сил для существующего железобетонного фонда европейских зданий. Бж. Земляк. англ. 2021, 19, 2839–2865. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

32. Осина Р.; Ferrari, SLP Общий класс моделей с завышенной бет-регрессии с нулем или единицей. Вычислитель. Стат. Анализ данных. 2012, 56, 1609–1623. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

33. Основная команда R. R: Язык и среда для статистических вычислений; Фонд статистических вычислений R: Вена, Австрия, 2023 г. Доступно онлайн: <https://www.R-project.org/> (по состоянию на 15 октября 2023 г.).

34. Феррари, СЛП; Кривари-Нето, Ф. Бета-регрессия для моделирования темпов и пропорций. Дж. Прил. Стат. 2004, 31, 799–815. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

35. Дольче, М.; Каппос, А.; Маси, А.; Пенелис, Г.; Вона, М. Оценка уязвимости и сценарии ущерба от землетрясения строительного фонда Потенцы (Южная Италия) с использованием итальянских и греческих методологий. англ. Структур. 2006, 28, 357–371. [\[Перекрестная ссылка\]](#)

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно авторам(ам) и участникам(ам), а не MDPI и/или редакторам(ам). MDPI и/или редактор(ы) несут ответственность за любой вред людям или имуществу, возникший в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.