

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ПОДХОДОВ К СОКРАЩЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2024 г. П.Н. Шебалин^{а,*}, С.А. Тихоцкий^{б,**}, А.А. Коваленко^{с,***}

^аИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

^бИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

^сАО “Российская национальная перестраховочная компания”, Москва, Россия

*E-mail: shebalin@mitp.ru

**E-mail: sat@ifz.ru

***E-mail: anton.kovalenko@rnrc.ru

Поступила в редакцию 15.07.2024 г.

После доработки 15.08.2024 г.

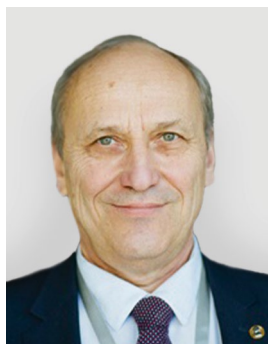
Принята к публикации 29.08.2024 г.

Катастрофические землетрясения на территории России не происходили со времени Нефтегорского землетрясения 1995 г. Почти 30 лет видимого спокойствия не означают, однако, что такие катастрофы исключены в ближайшие десятилетия. За прошедшие 30 лет произошло около 10 сравнимых по силе с Нефтегорским землетрясений, но все они фиксировались в малонаселённых районах Камчатки, Курил, Алтая. Опыт недавних землетрясений в Турции и Марокко показывает, что принятые во всём мире, включая Россию, подходы к оценке сейсмической опасности и система использования таких оценок при строительстве нуждаются в корректировке. В статье обсуждается необходимость применения как вероятностного подхода, так и методов детерминистского анализа, обеспечивающих большую надёжность при детальном сейсмическом районировании в местах возможных катастрофических землетрясений и при строительстве важных объектов. Оценки сейсмического риска в масштабах страны ранее не проводились, но они необходимы для внедрения системы страхования от стихийных бедствий и приоритизации расходов на укрепление зданий в сейсмоопасных районах. Авторы не только предлагают пути совершенствования подходов к сокращению ущерба от землетрясений, но и обосновывают необходимость тесной кооперации широкого круга специалистов.

Статья подготовлена на основе доклада, заслушанного на заседании президиума РАН 11 июня 2024 г.

Ключевые слова: оценка сейсмической опасности, вероятностный и детерминистский анализ сейсмической опасности, сейсмический риск, общее сейсмическое районирование, детальное сейсмическое районирование, цифровая модель сейсмической опасности.

DOI: 10.31857/S0869587324100046, EDN: ESADFW



ШЕБАЛИН Пётр Николаевич — член-корреспондент РАН, директор ИТПЗ РАН. ТИХОЦКИЙ Сергей Андреевич — член-корреспондент РАН, директор ИФЗ РАН. КОВАЛЕНКО Антон Алексеевич — начальник отдела АО “РНПК”.

Землетрясения входят в число самых опасных природных катастроф, от них гибнут люди, разрушаются жилища, страдает инфраструктура¹. В последние три десятилетия в России произошёл ряд сильнейших землетрясений. Они зафиксированы, в частности, на границе Евроазиатской и Тихоокеанской тектонических плит — вблизи курильского острова Симушир 15 сентября 2006 г. и 13 января 2007 г. и на большой глубине (около 600 км) под Охотским морем в районе Камчатки 24 мая 2013 г. Магнитуда каждого из них превысила 8. Охотоморское землетрясение из-за большой глубины ощущалось даже в Москве, но по той же причине нигде не привело к значимому ущербу. Два Симуширских землетрясения произошли вблизи необитаемого в настоящий момент острова, поэтому также не нанесли значимого ущерба в районе своих эпицентров. Тем не менее первое из них вызвало цунами высотой до 20 м. Волна пересекла Тихий океан и дошла до берегов Калифорнии, сохранив высоту почти 2 м и причинив ощутимый ущерб. Другие сильнейшие землетрясения на территории России также происходили в малонаселённых районах, поэтому не сопровождались катастрофическим ущербом. Это Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. ($M=7.9$), Чуйское 27 сентября 2003 г. на Алтае вблизи границы с Монголией ($M=7.3$), Олюторское на севере Камчатки 21 апреля 2006 г. ($M=7.6$), Тувинские землетрясения 27 декабря 2006 г. и 26 февраля 2007 г. (оба $M=6.7$), Илин-Тасское на севере Якутии 14 февраля 2013 г., землетрясения вблизи Командорских островов 29 марта 2017 г. и 20 декабря 2018 г. ($M=7.8$ и $M=7.3$).

На протяжении почти 30 лет землетрясения на территории России не приводили к катастрофическим последствиям, но это не означает, что такая ситуация будет сохраняться в дальнейшем. Катастрофические землетрясения всегда происходят внезапно и в относительно неожиданных местах. Недавняя катастрофа 6 февраля 2023 г. в Турции и Сирии (два землетрясения произошли с временным интервалом 9 ч. и имели магнитуду 7.8 и 7.5 соответственно) заставляет вспомнить о единственном действенном катастрофическом землетрясении на территории России в современную эпоху, которое произошло в г. Нефтегорск на Сахалине 28 мая 1995 г. ($M=7.6$). Город с трёхтысячным населением был полностью разрушен, погибло две трети его жителей.

Строительство в сейсмоопасных районах России, так же как и в большинстве стран, расположенных в сейсмически активных зонах, регулируется законодательно. В России основным нормативным документом служит свод правил СП 14.13330.2018, который в 2018 г. заменил действовавший до этого разработанный в СССР СНиП II-7-81. Строитель-

ные нормы для конкретных объектов принимаются в зависимости от нормативной интенсивности сейсмических воздействий, определяемой комплектом карт Общего сейсмического районирования (ОСР), создававшихся в СССР с 1930-х годов. Как и в мире, советские карты ОСР 1936, 1949, 1957, 1968, 1978 гг. строились на детерминистском принципе: считалось важным определить, каково максимально возможное воздействие землетрясения в каждой точке карты.

На Западе строительная отрасль давно связана с системой страхования, в том числе от стихийных бедствий. Поэтому уже в 1960-е годы в западных странах, начиная с США, стали разрабатываться модели сейсмического риска, по которым оценивался возможный ущерб от землетрясений — с тем, чтобы страховые компании могли оценивать необходимый размер страховых премий. За основу были взяты вероятностные модели сейсмической опасности, цель которых — выяснить, с какой вероятностью в заданный период времени в данной точке или на данном объекте возможны воздействия заданной степени. Сейсмический риск определяется наложением на такую модель модели экономического ущерба при заданном сейсмическом воздействии на отдельный объект, их группу, целый район или область.

Оценки сейсмического риска в масштабах всей России до сих пор не проводились. При добровольном страховании страховщики опираются на карты ОСР и данные исследований, предоставляемые страхователем. Планировавшееся в России обязательное страхование жилья от чрезвычайных ситуаций не получило развития отчасти из-за отсутствия реальных инструментов оценки. Без них риск оценивается как запретительный для территорий с высокой нормативной интенсивностью (балльностью) и как отсутствующий для прочих регионов. Такой подход привёл бы к отказу страховщиков от работы в сейсмоопасных регионах и нездоровой конкурентной борьбе за рынки других регионов.

Наконец, из мировой практики хорошо известно, что в случае катастрофических землетрясений средств страховых и перестраховочных компаний не хватает на полное покрытие ущерба, и помощь государства в таких случаях неизбежна. Поэтому необходимы законодательные решения, предусматривающие ограниченную ответственность страховых и перестраховочных компаний в случае крупных катастроф. Ситуация осложнена тем, что оценку объёма страховых и перестраховочных резервов на случай масштабных катастроф и величину необходимой материальной помощи государства невозможно дать с использованием традиционных инструментов.

Оценки сейсмического риска имеют и другую важную сторону. Современное строительство в сейсмоопасных регионах ведётся с учётом необходимой сейсмостойкости, но многие старые постройки либо

¹ Статья продолжает анализ проблемы сейсмической опасности, предпринятый в работе [1].

были сооружены без такого учёта, либо частично утратили необходимую прочность вследствие длительного срока эксплуатации. Расчёты сейсмического риска в масштабах страны позволят наиболее рационально разместить средства на необходимое сейсмоусиление объектов жилого фонда и инфраструктуры.

Примером инструмента для расчёта риска может служить реализуемый в АО «Российская национальная перестраховочная компания» проект Риск-офис. Проработка его концепции была начата в 2019 г. по поручению Банка России. Главная цель проекта — сбор данных и построение моделей для оценки влияния определённых рисков (главным образом связанных с природными и вызванными человеком катастрофами) на финансовую устойчивость страхового сектора и для определения страховых тарифов и резервов, формируемых страховыми компаниями, а также для оценки возможного кумулятивного экономического ущерба по всей территории Российской Федерации. В настоящее время реализуются компоненты риск-офиса для оценки рисков, связанных с землетрясениями и наводнениями. Для расчётов сейсмического риска используется разработанная в ИТПЗ РАН в рамках государственного задания и проектов Российского научного фонда цифровая модель сейсмического режима, учитывающая афтершоковую активность, и модель затухания сейсмического воздействия, учитывающая геометрию системы разломов. Модели обеспечивают детальность, необходимую для расчётов риска как для отдельных объектов или их групп, так и для протяжённых территорий. Предполагается регулярное (не реже одного раза в 5 лет) обновление данных и параметров моделей. Таким образом, будет достигаться поддержание карты и методики оценки рисков в актуальном состоянии.

Карты общего сейсмического районирования территории Российской Федерации с 1997 г. фактически не обновлялись. В 2015 г., после воссоединения Крыма с Россией, был принят новый вариант карт — ОСР-2015. Помимо добавления сейсмического районирования территории Крыма, по сравнению с ОСР-97, на картах была увеличена ожидаемая балльность на севере Якутии и Камчатки, где произошли Илин-Тасское землетрясение 2013 г. и Олюторское 2006 г. На картах ОСР-97 сейсмическая опасность в этих районах оказалась недооценённой на 2 балла. Позднее был принят обновлённый комплект карт ОСР-2016, но затем это изменение отменили, и действующими снова стали карты ОСР-2015, мало отличающиеся от ОСР-97. Такой консерватизм в строительной отрасли вполне объясним и в определённой мере даже необходим. Частая смена нормативной интенсивности сейсмических воздействий неизбежно приводит к значительным издержкам. Тем не менее известно, что карты ОСР содержат ошибки как в сторону недооценки балльности в районе эпицентров целого ряда

землетрясений, так и в сторону примерно 4-кратного завышения ожидаемой за 25 лет с 1997 г. площади зон нормативной интенсивности каждого балла по сравнению с площадью зон фактически наблюдаемой интенсивности [2]. Если ошибки в сторону недооценки балльности можно объяснить тем, что соответствующие землетрясения произошли в малонаселённых (а, следовательно, и малоизученных) районах, то ошибки, связанные с переоценкой сейсмической опасности, по-видимому, в основном связаны с субъективным фактором в методике оценки. Именно субъективный фактор оценок вызывает обычно наибольшую критику в отношении карт ОСР.

Действующие карты ОСР [3] построены по методике вероятностного анализа сейсмической опасности, получившей широкое распространение в мире в 1990-е годы в рамках международной программы GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program) [4]. При этом используются две модели: первая определяет места (гипоцентры) и частоту повторения землетрясений каждой магнитуды, на основе второй — модели затухания — рассчитывается интенсивность воздействия землетрясения с конкретными гипоцентром и магнитудой в конкретной точке на поверхности Земли или на конкретном объекте. Совмещение двух моделей позволяет определить частоту повторения воздействий землетрясений в заданной точке — сотрясаемость.

Идея вероятностного анализа сейсмической опасности — оценка сотрясаемости была впервые предложена членом-корреспондентом АН СССР Ю.В. Ризниченко [5]. Аналогичная идея независимо была выдвинута в 1968 г. американским сейсмологом К. Корнеллом [6]. Основу этой теории составляет известный закон Гутенберга—Рихтера [7], в соответствии с которым логарифм числа землетрясений определённой магнитуды пропорционален магнитуде с отрицательным коэффициентом пропорциональности. Таким образом, детерминистский подход, подразумевающий, что землетрясения происходят на тектонических разломах, сохранивших активность в голоцене, был расширен применением закона Гутенберга—Рихтера. При этом выделяются линейные структуры, соответствующие активным разломам, для которых определяются параметры закона Гутенберга—Рихтера. Поскольку далеко не все гипоцентры землетрясений удавалось ассоциировать с конкретными известными разломами, К. Корнелл дополнительно ввёл площадные структуры. Ему удалось получить аналитическое решение для комбинации этой модели с моделью затухания, в соответствии с которой интенсивность сейсмического воздействия убывает пропорционально логарифму расстояния до гипоцентра (аналитическое решение требовалось потому, что в то время ещё не хватало вычислительных возможностей для решений численных). Разбиение территории на небольшое количество линейных и площадных элементов

решало проблему неполноты каталогов землетрясений. Параметры действия закона Гутенберга–Рихтера можно было оценить лишь для достаточно больших объектов, внутри которых распределение принималось равномерным.

В рамках программы GSHAP упрощённая линейно-площадная модель Корнелла была сохранена, но вместо аналитического решения стал использоваться синтетический каталог землетрясений и метод Монте-Карло. В некоторых странах в модель был добавлен ещё один элемент — отдельные очаги землетрясений. Такое добавление стало результатом наблюдения так называемых характеристических землетрясений [8], повторяемость которых значительно выше, чем ожидаемых по закону Гутенберга–Рихтера и статистике более слабых событий. Включению этого элемента в модель способствовали и получившие развитие палеосейсмические методы обнаружения очагов древних землетрясений [9]. Позднее теория “характеристических” землетрясений неоднократно подвергалась критике. Главным опровергающим её аргументом служит тот факт, что закон Гутенберга–Рихтера выполняется лишь в области, линейный размер которой многократно превышает линейный размер землетрясения максимальной зарегистрированной в этой области магнитуды [10].

В картах ОСР-97, которые строились на принципах GSHAP, также использовалась модель, состоящая из элементов трёх типов. В отечественной литературе эта модель получила название ЛДФ (линеаментно-доменно-фокальная). Линейные структуры, соответствующие активным разломам, получили название линеаментов, а площадные элементы — доменов. Каждый такой элемент характеризуется двумя параметрами закона Гутенберга–Рихтера и максимально возможной магнитудой. Для линеаментов максимальная магнитуда определяется их длиной, для доменов — максимальной фактически наблюдаемой, с фиксированной добавкой. Третий элемент — отдельные очаги — отражает гипотезу характеристических землетрясений. Отдельные очаги характеризуются только магнитудой и повторяемостью. Такая модель, очевидно, включает очень большое количество субъективных факторов. В работах различных авторов положение и границы разломов часто различаются, и нет объективных методов выбора наиболее точного решения. Выбор границ доменов в принципе не имеет однозначного решения. Это хорошо иллюстрируют очень значительные различия ЛДФ-моделей, которые легли в основу карт ОСР-97 [3] и ОСР-2016 [11].

Заметное улучшение за последние десятилетия качества каталогов землетрясений, снижения уровня представительной магнитуды открывают принципиальную возможность перехода от упрощённых моделей типа ЛДФ к моделям сглаженной сейсмичности, в которых параметры закона Гутенберга–

Рихтера определяются, например, в узлах, расположение и густота которых могут быть адаптированы не только к параметрам сейсмического режима, но и к объёму и качеству имеющейся сейсмологической информации. Переход к новым моделям постепенно становится общемировой тенденцией [12]. Различают два основных подхода. Первый из них предполагает, что параметры закона Гутенберга–Рихтера оцениваются в кругах постоянного радиуса [13], в соответствии со вторым — по заданному числу ближайших к узлу сетки эпицентров [14]. В первом случае при достаточно большом радиусе выполняются условия закона Гутенберга–Рихтера, но карта параметров оказывается чрезмерно сглаженной. Во втором — при хорошей контрастности оценок в местах высокой активности нарушается условие выполнения закона Гутенберга–Рихтера. Недавно предложенный метод “среднего положения” [10, 15] сочетает в себе преимущества обоих подходов: параметры определяются в кругах достаточно большого радиуса, но значения приписываются не центру круга, а среднему положению попавших в него эпицентров. В методе учитываются квазифрактальные свойства пространственного распределения сейсмичности, благодаря чему сумма теоретических магнитудно-частотных распределений по всем ячейкам регулярной сетки, рассчитанных по оценкам параметров, совпадает с зарегистрированной по всему региону.

Оценки параметров закона Гутенберга–Рихтера на близкой к регулярной сетке, покрывающей исследуемую территорию, в принципе позволяют получить локальные оценки повторяемости самых сильных землетрясений. Однако при этом ненулевая вероятность таких событий будет получена во всех узлах сетки, а высокие значения повторяемости “размазаны” по слишком большой территории. В результате это может привести к снижению вероятности сильного воздействия от землетрясений в каждой конкретной точке, то есть недооценке сейсмической опасности в действительно опасных местах. Общепринятое решение в рамках моделей сглаженной сейсмичности — ограничение территорий, на которых возможны сильнейшие землетрясения [12]. Например, это могут быть окрестности крупных разломов. Другой вариант — использование результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [16]. Выделение опасных участков активных разломов возможно также путём исследования напряжённого состояния разломов методами спутниковой навигации, интерферометрии [17, 18] и тектонофизики [19], а также их комбинирования.

Оценки сейсмической опасности могут в значительной степени зависеть от выбора исходных данных — каталогов землетрясений, в особенности от используемой шкалы магнитуды. Наиболее подробные данные о землетрясениях в сейсмоопасных регионах России формируют региональные филиа-

лы Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (ЕГС РАН) [20]. В каждом из её филиалов исторически сложились свои методики определения параметров землетрясений. В качестве энергетической характеристики этих событий традиционно используется энергетический класс, предложенный известным советским и российским сейсмологом Т.Г. Раутиан [21], с различными региональными модификациями, а пересчёт к используемой во всём мире магнитуде ведётся по корреляционным соотношениям.

Данные с большинства сейсмических станций ЕГС РАН передаются в международные центры, в том числе в Международный сейсмологический центр (International Seismological Centre, ISC). В ISC с использованием исходных станционных данных осуществляется перерасчёт магнитуды землетрясений по единой методике [22]. Для наиболее сильных землетрясений используется шкала “моментной магнитуды” M_w , для более слабых, для которых невозможно оценить сейсмический момент и, соответственно, магнитуду M_w , — шкала магнитуды по объёмным волнам. При этом шкалы хорошо стыкуются: магнитудно-частотные распределения сохраняют в билогарифмическом масштабе прямолинейную форму в широком диапазоне [22]. Это свойство позволяет калибровать различные региональные определения магнитуды или энергетического класса к единой шкале [23–25]. В ISC для определения параметров землетрясений на территории России используются данные не только Российских станций. Благодаря этому в каталоге ISC часто присутствуют данные о землетрясениях, отсутствующие в региональных каталогах ЕГС РАН. Верно и обратное, поэтому объединение региональных данных ЕГС РАН и данных ISC позволяет сформировать существенно более полный каталог по сравнению с каждой из используемых составляющих. Для более точных оценок сейсмической опасности и сейсмического риска необходимо создать наиболее полные и однородные по магнитуде каталоги землетрясений. В нерезализованном пока идеале это должен быть единый каталог землетрясений всех сейсмоопасных территорий России и приграничных районов, в котором параметры событий будут определены по единой методике с использованием исходных данных максимально возможного числа сейсмических станций. Паллиативное решение предполагает создание объединённых каталогов путём алгоритмической ассоциации данных разных источников с одним и тем же землетрясением. Сравнение разных магнитудных определений в объединённом каталоге для одного и того же сейсмического события позволяет получить корреляционные соотношения разных типов магнитуды и на их основе привести магнитуду к единой шкале. Объективность оценок для результирующего объединённого “калиброванного” каталога землетрясений может обеспечиваться и контролироваться

благодаря открытому доступу к каталогу, как это сделано, в частности, для территорий Российской Арктики [23–25].

Форма представления результатов вероятностной оценки сейсмической опасности в виде карт ОСР не в полной мере соответствует целям такой оценки. Во-первых, на каждом из трёх вариантов карты фиксируется определённый уровень вероятности превышения нормативной интенсивности за 50 лет: 0.1 — вариант А, 0.05 — вариант В и 0.01 — вариант С карт ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016. Вариант А используется для объектов массового строительства, вариант В — для объектов повышенного уровня ответственности, таких как объекты социального обеспечения, торговые центры и здания высотой более 75 м, С — для особо ответственных объектов, включая правительственные здания и объекты жизнеобеспечения. Таким образом, каждый из вариантов карт ОСР используется де-факто как детерминистская оценка разной степени надёжности или неопределённости не превышения нормативной интенсивности. Более того, поскольку в основе вероятностного подхода лежит закон Гутенберга–Рихтера, а значит, вероятность понимается в частотном смысле, карты В и особенно С вряд ли можно считать вероятностными. Учёт частоты повторения сейсмических воздействий имеет смысл лишь в том случае, если возможна реализация нескольких циклов события при одних и тех же условиях за некоторый период. Карта С подразумевает повторяемость примерно один раз в 5000 лет. За это время система тектонических разломов претерпевает довольно значимые изменения, и ранее более активные участки могут стать менее активными и наоборот, в итоге смысл “повторяемости” теряется.

Во-вторых, карты ОСР не учитывают корреляцию эффектов от землетрясений по пространству и времени. Зоны одной и той же балльности могут быть образованы как за счёт редких, но сильных сейсмических событий, так и за счёт большого числа более слабых, происходящих в разное время на большой территории. В первом случае разрушения произойдут одновременно на большом пространстве, во втором — эффект каждый раз будет локальным и проявляться в разное время. Совокупный накопленный ущерб при прочих равных условиях в первом случае будет намного значительнее.

Цель вероятностного анализа — получение адекватных оценок сейсмической опасности и сейсмического риска и переход к риск-ориентированному подходу в сейсмостойком строительстве во избежание необоснованных затрат. Для достижения этой цели целесообразно переходить от карт сейсмического районирования к цифровым моделям, включающим каталоги землетрясений, сведения о сейсмогенерирующих структурах и утверждённые алгоритмы расчёта как нормативной сейсмичности и интенсивности сейсмических воздействий, так

и сейсмического риска. При этом открытый доступ к исходным базам данных способствовал бы повышению объективности данных и результатов оценок.

Цифровая модель сейсмичности — это синтетический каталог землетрясений, воспроизводящий свойства реального каталога, но генерируемый на произвольный условный период. Использование синтетического каталога, включающего условное время землетрясений, удобно при расчётах сейсмического риска. Для произвольного объекта строительства или группы объектов методом Монте-Карло (перебором всех событий синтетического каталога) с использованием модели затухания может быть рассчитана частота повторения определённой степени воздействия землетрясений, а по модели экономического ущерба — совокупный ущерб за конкретный период. При этом возможно учитывать и снижение сейсмостойкости при каждом разрушительном воздействии.

Цифровая модель сейсмической опасности допускает учёт вклада сильных повторных толчков — афтершоков. При определении параметров модели сейсмичности афтершоки исключают из рассмотрения. Это связано с тем, что афтершоки концентрируются в пространстве и времени вблизи отдельных землетрясений, на какой-то период значительно увеличивая частоту сейсмических событий. Любой каталог инструментально зарегистрированных землетрясений охватывает период всего в несколько десятков лет. За это время в каких-то местах сильные землетрясения с большим числом афтершоков уже произошли, а в каких-то нет. Поэтому использование полного каталога приводило бы к локальному завышению опасности вблизи эпицентров состоявшихся сильных землетрясений. Но количество удалённых из каталога афтершоков обычно приблизительно совпадает с количеством основных толчков, и среди них бывают очень сильные афтершоки. Внимание к опасности афтершоков резко выросло после серии землетрясений в регионе Кентербери на Южном острове Новой Зеландии в конце 2010 — начале 2011 г. Первое землетрясение 4 сентября 2010 г. магнитудой 7.3 вызвало частичные повреждения зданий и инфраструктуры в регионе, в том числе в г. Крайстчёрч, — на тот период втором по численности населения городе Новой Зеландии. 22 февраля 2011 г. прямо под городом произошёл афтершок магнитудой 6.3, вызвавший человеческие жертвы и значительные разрушения. Другой яркий пример важности учёта опасности афтершоков — второе землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции. Разрушения от повторных толчков могут быть очень большими, даже если их сила намного меньше силы основного толчка, в результате которого нарушается конструктивная прочность зданий. Чтобы учесть опасность афтершоков в мировой практике уже применяется стохастическое моделирование на основе широко известной модели ETAS (Epidemic-type aftershock

sequences) [26]. Стандартная модель ETAS обычно завышает количество афтершоков, но её модификация на основе закона продуктивности [27, 28] обеспечивает примерно такую же долю афтершоков в синтетическом каталоге, какая была удалена из каталога фактических землетрясений [28].

Синтетический каталог землетрясений может быть использован для количественной проверки соответствия модели реальной сейсмичности. Для этого уже разработаны математические методы [29], которые также позволяют количественно сравнивать разные модели. Подобный анализ важен при выборе наиболее адекватной модели.

Очень сложная и малоисследованная проблема вероятностных оценок — нестационарность сейсмических процессов и неопределённость масштабов времени, в которых сейсмическую активность можно считать стационарной. Учёные постепенно приходят к консенсусу, что вероятностный анализ может давать более или менее надёжные оценки лишь на период около 50 лет [12]. Такие оценки вполне достаточны для расчётов сейсмического риска, необходимых для целей как страхования и перестрахования и приоритизации вложений на сейсмоусиление старых строений. Оценки с использованием цифровой модели сейсмической опасности могут и должны стать основой более детальных исследований в местах, где существует определённая вероятность значительных разрушений при землетрясении. Для обеспечения сейсмобезопасности в таких местах, а также при строительстве ответственных объектов необходимо применять и совершенствовать методы детального сейсмического районирования (ДСР).

В настоящее время ДСР направлено главным образом на учёт локальных особенностей геологического строения, включая грунтовые условия, выявление и уточнение положения сейсмогенерирующих структур, экспериментальное изучение спектров реакции, выявление очагов слабых землетрясений и имеет своей целью уточнение карт ОСР в более детальном масштабе. Развивать ДСР необходимо не только в направлении совершенствования моделей затухания сейсмических волн, вплоть до моделирования сейсмического воздействия потенциальных землетрясений на конкретные сооружения, но и актуализации оценки сейсмического потенциала и напряжённого состояния геологических структур методами тектонофизики, спутниковой геодезии, интерферометрии, математического моделирования.

Важность совершенствования моделей затухания можно пояснить на примере г. Петропавловск-Камчатский. Для этого города опасность может представлять приповерхностное землетрясение, эпицентр которого окажется в непосредственной близости. Но его магнитуда не будет очень большой, а вероятность события невелика. Гораздо большую опасность представляют землетрясения на грани-

це Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит, магнитуда которых может достигать 8 и выше. Однако граница плит проходит на расстоянии более 100 км от Петропавловска-Камчатского — либо прямо под городом на глубине, либо ближе к поверхности дна океана, но тоже на удалении. Пример — землетрясение 25 ноября 1971 г. магнитудой 7.2, произошедшее на глубине около 120 км, его эпицентр был недалеко от города. В самом Петропавловске-Камчатском из-за большой глубины очага землетрясение ощущалось силой в VI–VII баллов. Поскольку в этом районе возможны и более сильные землетрясения, точная модель затухания сейсмических волн, а также учёт их вероятных спектральных характеристик позволят с большей точностью смоделировать возможное воздействие землетрясений на здания и инфраструктуру города.

Особую опасность представляют землетрясения, очаг которых выходит на поверхность Земли, такие, как Нефтегорское 28 мая 1995 г., в Турции 6 февраля 2023 г. Для подобных случаев фактически никакие меры по сейсмоусилению конструкций не могут предотвратить их разрушение [30]. Необходимо выявлять места возможного выхода разломов на поверхность при землетрясении и избегать там строительства каких-либо постоянных сооружений.

Важное направление исследований, которое позволит моделировать воздействие гипотетических землетрясений на конкретные объекты, — моделирование протяжённых и сложных очагов землетрясений и излучения из них сейсмических волн. Это направление было успешно начато в 1970-е годы в СССР, активно продолжается за рубежом, а достижения советских и российских исследователей в области моделирования распространения упругих волн [31, 32] позволяют внедрять его в практику отечественной сейсмологии. Моделирование очагов применяется для построения синтетических акселерограмм, широко используемых в инженерной сейсмологии. Для проверки и уточнения моделей воздействия землетрясений большое значение имеет построение баз данных фактических акселерограмм.

Важную роль играют поиск данных об исторических землетрясениях, палеосейсмические исследования. В существующих методах оценки сейсмической опасности обычно принимается предположение о том, что если в данном месте произошло сильное землетрясение, то событие такой же силы в этом месте может повториться. Но, с другой стороны, в результате сильного землетрясения высвобождается накопленная в течение долгого времени упругая энергия, и для нового сильного землетрясения аналогичная энергия должна накопиться снова. Локальное перераспределение напряжений может спровоцировать возникновение очагов сильных повторных толчков на некотором удалении от очага первого события (примеры — второе землетрясение в Турции 6 февраля 2023 г., повторное Симу-

ширское землетрясение 13 января 2007 г.). Но после относительно краткосрочной активизации в районе крупных землетрясений обычно наступает многолетний период снижения сейсмической активности. Вопрос о том, представляют ли очаги состоявшихся землетрясений опасность в обозримом будущем, опасны ли другие участки системы разломов, должен решаться с помощью детальных исследований геофизическими методами. Геодинамическое моделирование с использованием спутниковой геодезии и интерферометрии, достигающих миллиметровой точности в определении смещений точек земной поверхности [18, 33], оценка напряжённого состояния участков системы тектонических разломов методами тектонофизики с использованием данных о механизмах очагов землетрясений [19] могут помочь решению задачи о степени опасности той или иной сейсмогенной структуры на определённый период. Перечисленные методы давно и успешно развиваются в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, частично в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, ФИЦ “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, Институте земной коры СО РАН.

Вариации сейсмической активности могут быть значительными на интервалах порядка десятилетий. Исследования по средне- и долгосрочному прогнозу землетрясений дают возможность перехода к зависящим от времени оценкам сейсмической опасности [34]. Такие оценки всё чаще используются в мире [12].

* * *

Анализ существующих подходов к оценке сейсмической опасности, опыта их применения за последние два–три десятилетия, новых методов параметризации сейсмичности и исследования напряжённого состояния в системах тектонических разломов, которые активно развивались в этот период, дают основания для совершенствования подходов к сокращению ущерба от землетрясений.

Ущерб от землетрясений может быть связан не только с прямыми экономическими потерями, социальными последствиями катастроф, отрицательным влиянием на экономику страны в целом, но и с косвенными потерями — излишними затратами на сейсмоусиление зданий там, где оценка сейсмической опасности неоправданно завышена. Сокращению таких потерь будет способствовать постепенный переход к риск-ориентированному подходу, в котором (при наличии адекватных моделей сейсмического риска) объём средств, выделяемых на меры по сейсмоусилению в пределах предприятия, населённого пункта, района и т.д., будет сопоставляться с ожидаемыми потерями при условии неприменения или частичного применения таких мер.

Вероятностный анализ сейсмической опасности может давать более или менее надёжные оценки на

период около 50 лет. Поэтому основными сферами его применения в сейсмоопасных регионах должны стать оценки сейсмического риска, используемые в системе страхования и перестрахования от стихийных бедствий, для приоритизации расходов на укрепление старых зданий и сооружений. В строительстве вероятностные оценки сейсмической опасности целесообразно по-прежнему использовать в отношении объектов общегражданского назначения и для определения мест необходимого детального районирования.

Актуальна более общая форма представления вероятностных оценок сейсмической опасности в виде цифровой модели, включающей каталоги землетрясений, сведения о сейсмогенерирующих структурах и утверждённые алгоритмы расчёта как нормативной сейсмичности, так и сейсмического риска, то есть ожидаемых человеческих или экономических потерь. Совершенствование вероятностного анализа сейсмической опасности необходимо вести в направлении минимизации влияния на цифровую модель субъективных факторов. Объективность данных и результатов оценок должна обеспечиваться, в частности, открытостью исходных баз данных и алгоритмов их обработки.

Для обеспечения сейсмобезопасности в местах возможных катастрофических землетрясений и строительства ответственных объектов необходимо применять и совершенствовать методы детального сейсмического районирования (ДСР). Развитие ДСР необходимо вести как в направлении усовершенствования моделей затухания сейсмических волн, вплоть до моделирования воздействия потенциальных землетрясений на конкретные сооружения, так и развития методов оценки сейсмического потенциала геологических структур методами тектонофизики, спутниковой геодезии, интерферометрии, математического моделирования.

Проблема нестационарности сейсмических процессов даже на временных интервалах порядка десятков лет подтверждает актуальность исследований по прогнозу землетрясений, хотя результаты применения различных алгоритмов прогноза пока не дают оснований для оперативного реагирования. В то же время результаты долгосрочного и, в меньшей степени, среднесрочного прогноза землетрясений уже в настоящее время могут использоваться для построения зависящих от времени вероятностных оценок сейсмической опасности и, соответственно, сейсмического риска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шебалин П.Н. Современные подходы к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. № 8. С. 738–748.

2. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 1. С. 91–97.
3. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедоев Б.А., Скоркина А.А. Why are new approaches to seismic hazard assessment required? // Dokl. Earth Sc. 2022, vol. 507, no. 1, pp. 930–935. (In Russ.)
4. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 1999 г. Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов; отв. сост. В.И. Уломов, Л.С. Шумилина, А.А. Гусев и др. М.: Объединённый институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Set of maps of general seismic zoning of the territory of the Russian Federation – GSZ-97. Scale: 1:8000000. 4 sheets / Ed.-in-chief V.N. Strakhov, V.I. Ulomov; responsible compilers V.I. Ulomov, L.S. Shumilina, A.A. Gusev et al. M.: United Institute of Physics of the Earth named after O.Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences, 1999. (In Russ.)
5. Giardini D., Grunthal G., Shedlock K.M., Zhang P. The GSHAP Global Seismic Hazard Map // Annali di Geofisica. 1999, vol. 42, iss. 6, pp.1225–1228. DOI: 10.4401/ag-3784
6. Ризниченко Ю.В. От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965. № 11. С. 1–12.
7. Riznichenko Yu.V. From the activity of earthquake foci to the shaking of the earth's surface // Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Solid Earth. 1965, no. 11, pp. 1–12. (In Russ.)
8. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968, vol. 58, iss. 5, pp. 1583–1606.
9. Gutenberg B., Richter C.F. Frequency of earthquakes in California // Bulletin of the Seismological Society of America. 1944, vol. 34 (4), pp. 185–188.
10. Wesnousky S.G. Crustal deformation processes and the stability of the Gutenberg-Richter relationship // Bulletin of the Seismological Society of America. 1999, vol. 89, no. 4, pp. 1131–1137.
11. Schwartz D.P., Coppersmith K.J. Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones // Journal of Geophysical Research. 1984, vol. 89, no. B7, pp. 5681–5698.
12. Шебалин П.Н., Баранов С.В., Воробьева И.А. et al. Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // Dokl. Earth Sc. 2024, vol. 515, pp. 514–525. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23603115>.
13. Уломов В.И., Богданов М.И. Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список

- населённых пунктов, расположенных в сейсмо-активных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–60.
- Ulomov V.I., Bogdanov M.I.* Explanatory note to the set of GSZ-2016 maps and a list of settlements located in seismically active zones // *Ingenernye izyskaniya*. 2016, no. 7, pp. 49–60. (In Russ.)
12. *Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T. et al.* Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2020, vol. 58, e2019RG000653. DOI: 10.1029/2019RG000653
 13. *Frankel A.* Mapping seismic hazard in the central and eastern United States // *Seismological Research Letters*. 1995, vol. 66 (4), pp. 8–21.
 14. *Helmstetter A., Werne M.J.* Adaptive spatiotemporal smoothing of seismicity for long-term earthquake forecasts in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012, vol. 102, no. 6, pp. 2518–2529. <https://doi.org/10.1785/0120120062>
 15. *Vorobieva I., Grekov E., Krushelnitskii K. et al.* High resolution seismicity smoothing method for seismic hazard assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, v. 24, no. 1, ES1003.
 16. *Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Дзёбоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 5–29. DOI: 10.31857/S0002333720010044
 - Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Soloviev A.A.* Problem of recognition of strong-earthquake-prone areas: a state-of-the-art review // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 1–23.
 17. *Vladimirova I.S., Lobkovsky L.I., Gabsatarov Y.V. et al.* Patterns of the seismic cycle in the Kuril Island arc from GPS observations // *Pure and Applied Geophysics*. 2020, vol. 177, no. 8, pp. 3599–3617. DOI: 10.1007/s00024-020-02495-z
 18. *Михайлов В.О., Тимошкина Е.П.* Геодинамическое моделирование процесса формирования и эволюции структур литосферы: опыт ИФЗ РАН // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 122–133.
 - Mikhailov V.O., Timoshkina E.P.* Geodynamic modeling of the process of the formation and evolution of lithospheric structures: the experience of Schmidt institute of Physics of the Earth, RAS // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2019, vol. 55, no. 1, CP102–110.
 19. *Ребецкий Ю.Л.* Тектонофизическое районирование сейсмогенных разломов Восточной Анатолии и Караманмарашские землетрясения 06.02.2023 г. // *Физика Земли*. 2023. № 6. С. 37–65.
 - Rebetsky Yu.L.* Ectonophysical zoning of seismogenic faults in Eastern Anatolia and February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023, vol. 59, no. 6, pp. 851–877.
 20. Землетрясения России. ФИЦ ЕГС РАН. 2003–2022; Землетрясения Северной Евразии. ФИЦ ЕГС РАН. 1992–2019.
 - Earthquakes in Russia. Federal Research Center Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences. 2003–2022; Earthquakes in Eastern Eurasia. Federal Research Center Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences 1992–2019. (In Russ.)
 21. *Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K. et al.* Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales // *Seismol. Res. Lett.* 2007, vol. 78, pp. 579–590.
 22. *Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A. et al.* ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed MS and mb, proxy MW, final magnitude composition and completeness assessment // *Phys. Earth Planet. Inter.* 2015, vol. 239, pp. 33–47.
 23. *Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N. et al.* Integrated earthquake catalog of the eastern sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022, vol. 12, no. 10, 5010.
 24. *Vorobeveva I.A., Gvishiani A.D., Shebalin P.N. et al.* Integrated earthquake catalog II: The Western sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 12, 7084.
 25. *Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Shebalin P.N. et al.* Integrated earthquake catalog III: Gakkel Ridge, Knippovich Ridge, and Svalbard Archipelago // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2023, vol. 13, no. 22, 12422.
 26. *Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D.* Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction // *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, p. B05301. DOI:10.1029/2003JB002879
 27. *Шебалин П.Н., Дзёбоев Б.А., Баранов С.В.* Закон повторяемости количества афтершоков // *Доклады РАН*. 2018. Т. 481. № 3. С. 320–323. DOI: 10.31857/S086956520001387-8
 - Shebalin P.N., Baranov S.V., Dzeboev B.A.* The law of the repeatability of the number of aftershocks // *Dokl. Earth Sc.* 2018, vol. 481, no. 1, pp. 963–966.
 28. *Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake Productivity Law // *Geophysical Journal International*. 2020, vol. 222, pp. 1264–1269.
 29. *Zechar J.D., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A.* Likelihood-based tests for evaluating space-rate-magnitude forecasts // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2010, vol. 100, no. 3, pp. 1184–1195. <https://doi.org/10.1785/0120090192>
 30. *Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л. и др.* Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряжённым разломам // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 511. № 2. С. 228–235.
 - Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Y.L. et al.* The 2023 Kahramanmaraş Earthquakes in Turkey:

- Seismic Movements along Conjugated Faults // *Dokl. Earth Sc.* 2023, vol. 511, no.2, pp. 703–709.
31. Petrov I.B., Golubev V.I., Beklemysheva K.A., Vasyukov A.V. Numerical modeling of earthquake impact on engineering structures on Arctic shelf // *Computational Mathematics and Information Technologies.* 2017, vol. 1 (2). <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2017-2-163-168>
 32. Golubev V.I., Kvasov I.E., Petrov I.B. Influence of natural disasters on ground facilities // *Mathematical Models and Computer Simulations.* 2012, vol. 4, no. 2, pp. 129–134.
 33. Steblov G.M., Shebalin P.N., Melnik G.E. Precise Satellite Geodetic Measurements and Geodynamic Research in Northern Eurasia: State and Prospects // *Dokl. Earth Sc.* 2024, vol. 518, pp. 1577–1584. DOI: 10.1134/S1028334X24602487
 34. Shebalin P., Narteau C., Holschneider M. From alarm-based to rate-based earthquake forecast models // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2012, vol. 102, no. 1, pp. 64–72.

ON IMPROVING APPROACHES TO REDUCING EARTHQUAKE DAMAGE

P.N. Shebalin^{a,*}, S.A. Tikhotsky^{b,**}, A.A. Kovalenko^{c,***}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Schmidt Institute of physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^c*JSC Russian National Reinsurance Company, Moscow, Russia*

*E-mail: shebalin@mitp.ru

**E-mail: sat@ifz.ru

***E-mail: anton.kovalenko@rnrc.ru

Catastrophic earthquakes have not occurred in Russia since the Neftegorsk earthquake of 1995. Almost 30 years of apparent calm do not mean, however, that such disasters will not occur in the coming decades. Over these 30 years, there have been about 10 earthquakes of comparable strength, but all of them were in sparsely populated areas of Kamchatka, the Kuril Islands, and Altai. The experience of recent earthquakes in Turkey and Morocco shows that the approaches to seismic hazard assessment and the system of using such assessments in construction adopted worldwide, including in Russia, need to be adjusted. The paper discusses the need to apply both a probabilistic approach to seismic hazard assessment, necessary for seismic risk calculations, and deterministic analysis methods that will allow moving to more reliable assessments for detailed seismic zoning in areas of possible catastrophic earthquakes and for the construction of important facilities. Seismic risk assessments have not previously been carried out on a national scale, but are necessary for the implementation of a disaster insurance system and prioritization of costs for strengthening buildings in seismically hazardous areas. The article was prepared on the basis of a report heard at a meeting of the presidium of the RAS on June 11, 2024.

Keywords: seismic hazard assessment, probabilistic and deterministic seismic hazard analysis, seismic risk, general seismic zoning, detailed seismic zoning, digital seismic hazard model.