

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К СОКРАЩЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2024 г. П.Н. Шебалин<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия

\*E-mail: shebalin@mitp.ru

Поступила в редакцию 26.05.2024 г.

После доработки 15.07.2024 г.

Принята к публикации 21.07.2024 г.

Катастрофическое землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции напомнило всему миру, включая Россию, о необходимости совершенствовать систему снижения сейсмической опасности. В нашей стране большие надежды возлагаются на сейсмостойкое строительство, опирающееся на отечественные карты общего сейсмического районирования (ОСР). Действующие карты основаны на вероятностном анализе сейсмической опасности и за 25 лет в целом себя оправдали. Допущенные ошибки (недооценка опасности в местах нескольких сильных землетрясений, завышение риска на обширных территориях) были неизбежны ввиду скудности данных, которые имелись на момент создания карт.

В статье анализируются наиболее вероятные причины ошибок в картах ОСР и пути их преодоления, обосновывается внедрение риск-ориентированного подхода с целью снижения совокупного экономического ущерба от землетрясений, включая нерациональные затраты на антисейсмическое усиление конструкций. Кроме того, приведён анализ вероятностного и детерминистского подходов к оценке сейсмической опасности.

**Ключевые слова:** слоистая геофизическая среда, Арктическая зона РФ, арктический шельф, геогидроакустические поля, поверхностные волны, ледовый покров, изгибно-гравитационные волны, сейсмогидроакустические дрейфующие ледовые антенны, пассивные сейсмотомографические методы, мониторинг локальных неоднородностей, геоэкология.

DOI: 10.31857/S0869587324080058, EDN: FDAHFF

Землетрясения — одни из самых смертоносных природных катастроф. Поэтому задачей стран, находящихся в зоне риска, становится уменьшение их последствий. Из 10 катаклизмов, повлёкших наибольшее число жертв в 1950–2023 гг., половина пришлась на землетрясения, а по суммарному урону за тот же период они заняли третье место после наводнений и тропических циклонов [1]. Ущерб

может быть значительно сокращён путём введения превентивных защитных мер.

Основной способ противостоять землетрясениям — усиление конструкций зданий и сооружений, благодаря чему они не разрушаются, а возможные повреждения минимизируются. Такие меры принимаются исходя из оценок сейсмической опасности и дифференцируются по ожидаемому уровню сейсмических воздействий. Точно предсказать их масштаб очень сложно. Обычно предполагается, что землетрясения происходят на уже сформировавшихся активных тектонических разломах, размер которых обуславливает максимальную магнитуду. Однако нередко сильные землетрясения случаются в нетипичных местах, поэтому у учёных может возникнуть соблазн зависеть риски. Защита зданий и сооружений требует значительных дополнительных вложений на этапе строительства. Чем точнее оценки сейсмической опасности, тем меньше совокупный ущерб, включая непредвиденные финансовые издержки. К сожалению, опыт применения методов оценки последствий землетрясений,



ШЕБАЛИН Пётр Николаевич — член-корреспондент РАН, директор ИТПЗ РАН.

разработанных в конце XX в., показал, что наиболее разрушительные события часто происходили там, где максимальный ожидаемый порог был меньше [2], при этом на больших территориях опасность преувеличивалась [3].

Чтобы оправдать дополнительные затраты на сейсмостойкое строительство нужно выяснить возможный ущерб от землетрясений. Основой для расчётов стал вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО, в англоязычной терминологии – Probabilistic Seismic Hazard Assessment, PSHA [4]). Страховые компании используют оценки сейсмического риска для определения соответствующих страховых тарифов и перестрахования (передача части ответственности от одной страховой компании другой), а местные органы власти и крупные корпорации – для оптимального распределения средств на усиление конструкций и другие меры снижения рисков. Система страхования позволяет аккумулировать целевые денежные фонды, чтобы использовать их для возмещения потерь, обусловленных землетрясениями, а также гибко оперировать строительными нормами. В 1990-е годы для проведения ВАСО была запущена международная программа GSHAP (The Global Seismic Hazard Assessment Program) [5]. В России этот подход был впервые применён при составлении комплекта карт общего сейсмического районирования ОСР-97 [6], однако главная цель ВАСО (экономические расчёты рисков ущерба от землетрясений и включение страховых и перестраховочных компаний в общую систему снижения сейсмической опасности) до сих пор не реализована.

Важную роль в снижении сейсмической опасности играет прогноз землетрясений, обычно подразумевающий предсказание времени их возникновения, места и силы. Во второй половине XX в., в связи с быстрым развитием сейсмических сетей и увеличением наблюдательной базы в других областях геофизики, учёные ожидали стремительного прогресса и в прогнозировании [7–9]. Однако отсутствие научных прорывов в этой сфере привело к появлению теорий, согласно которым точные прогнозы землетрясений сложны или вовсе невозможны [10–13]. Это повлекло за собой почти полное прекращение финансирования прогнозных работ, в частности в Японии и США. Тем не менее длительная проверка среднесрочных прогнозов, например по алгоритму M8 (используется для предсказания мощных землетрясений магнитудой 7.5 и выше) [14], доказала их высокую статистическую значимость и оправданность. Например, в Италии и России (Камчатка) стали внедрять оперативный прогноз землетрясений, и эта информация направлялась местным властям [15, 16]. Чтобы ошибочно не приписывать успех прогнозам, оказавшимся на деле лишь случайными, необходимы количественные методы оценки их результатов. Кроме того, эти методы позволяют установить точность прогнозов с целью их адекватной интерпретации, в частности, для уточнения

общего сейсмического районирования для относительно коротких временных интервалов.

Создание систем раннего предупреждения – относительно новое направление в сфере сокращения ущерба от землетрясений. Системы построены на следующем принципе: продольная сейсмическая волна распространяется быстрее разрушительной поперечной волны, что позволяет в полностью автоматическом режиме, определив положение и силу источника волн, послать сигнал для оповещения населения и отключения электропитания от установок, которые могут подвергнуться особой опасности [17]. Такие системы активно развиваются во многих странах, включая США, Японию и Китай, чему также способствует краудсорсинг с использованием обычных смартфонов [18]. Смартфоны могут служить детекторами сейсмических волн, так как имеют встроенный акселерометр, а сети сотовой связи обеспечивают мгновенную передачу сигнала о пришедшей волне.

Не стоит забывать о планировании действий властей и обучении населения на случай возникновения чрезвычайной ситуации. Опыт ликвидации последствий многих разрушительных землетрясений показал, что эти меры помогают сократить ущерб от стихийного бедствия.

**Оценка сейсмической опасности.** В мировой практике уменьшение ущерба от землетрясений в основном сводится к применению в сейсмоопасных регионах специальных строительных технологий и сейсмоусиления, обеспечивающих большую устойчивость зданий. Степень сейсмических воздействий традиционно измеряется в баллах шкалы макросейсмической интенсивности (наиболее распространённые – МСК-64 и Mercalli) или в значениях пикового ускорения грунта (Peak Ground Acceleration, PGA). Максимально возможные показатели зависят от географического положения объекта и локальных условий, главное из которых – тип подстилающих грунтов. Зная ожидаемое максимальное воздействие, прибегают к разным уровням сейсмоусиления. Оценка сейсмической опасности включает определение ожидаемой степени сейсмических воздействий и производится в зависимости от географического положения для средних грунтов<sup>1</sup>, наиболее распространённых в зонах строительства. Результаты представляют в виде карт сейсмического районирования, на которых выделяют зоны ожидаемого максимального сейсмического воздействия определённой степени, например одной и той же балльности.

Существует два подхода к оценке сейсмической опасности:

- *детерминистский анализ сейсмической опасности* (ДАСО) отвечает на вопрос, каково мак-

<sup>1</sup> По плотности и твёрдости грунт подразделяется на слабый (песок, рыхлая земля), средний (растительная земля) и твёрдый (глина, каменные породы).

симально возможное воздействие от землетрясения в данной точке;

- *вероятностный анализ сейсмической опасности* (ВАСО) — с какой вероятностью в данной точке возможны воздействия заданной степени; в данном случае строится несколько карт с расчётами ожидаемого максимального воздействия в разные интервалы времени (например, 500, 5000, 10000 лет), что считается эквивалентным вероятности 0.1 превышения соответствующего уровня воздействия за 50, 500 и 1000 лет.

Оба подхода содержат две практически независимые составляющие. Первая — определение зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) — устанавливает, где, с какой силой и с какой частотой (в ВАСО) происходят землетрясения. Вторая заключается в построении модели воздействия землетрясений, включая затухание сейсмической волны на пути от очага до объекта. Несмотря на кажущуюся сложность, наибольший прогресс в мировой науке достигнут именно во втором случае.

Сейсмоусиление зданий и сооружений конкретного типа, в зависимости от ожидаемой степени воздействия, обычно обусловлено строительными нормами и правилами. Во многих странах этот директивный подход дополняется (а иногда заменяется) риск-ориентированным подходом, то есть более мягким стимулированием к внедрению мер сейсмоусиления с помощью системы страхования от стихийных бедствий. Очевидно, что затраты на сейсмоусиление на этапе строительства не должны превышать совокупный потенциальный ущерб для зданий без сейсмоусиления за период их эксплуатации. В противном случае эти финансовые издержки также могут рассматриваться как ущерб. Вероятностный подход был разработан именно с целью оптимизации расходов на сейсмостойкое строительство.

В России первая карта общего сейсмического районирования (ОСР) была создана в 1937 г. и впоследствии обновлялась в 1949, 1957, 1968 гг. Все карты базировались на детерминистском принципе. В 1978 г. была предпринята попытка учесть повторяемость сейсмических событий на основе каталога сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён [19]. В связи с тем, что срок эксплуатации и степень ответственности объектов отличаются, были выбраны интервалы в 100, 1000 и 10000 лет. Например, период эксплуатации жилых зданий обычно составляет не более 100 лет, а для объектов атомной энергетики или опасных химических предприятий повторяемость разрушительных землетрясений даже один раз в 1000 лет недопустима.

Карты ОСР-97 [6] строились на принципах ВАСО в рамках программы GSHAP. Они долгое время использовались в качестве нормативных при строительстве в сейсмоопасных регионах. Карты ОСР-2015 и ОСР-2016, составленные по той же

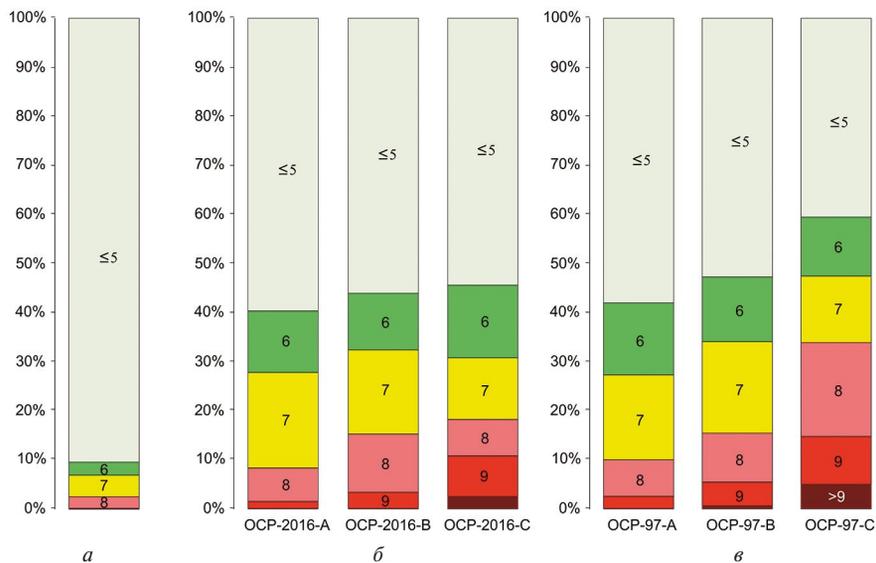
методике и также причисленные к нормативным, в значительной степени повторяют ОСР-97 и, по сути, лишь дополнены сильными землетрясениями, которые были пропущены в первом варианте. Для небольших территорий ожидаемая балльность снижалась, однако средняя сейсмическая опасность увеличивалась.

#### **Недостатки карт ОСР и их вероятные причины.**

В последние годы карты ОСР часто подвергались критике [20], главным образом из-за субъективности многих оценок, на которых базируются результирующие карты [21]. В работе [3] отмечается, что карты ОСР, помимо пропусков сильных землетрясений, фактически завышают сейсмическую опасность на очень больших территориях. Авторами также проведена оценка суммарных площадей теоретических изосейст [19] (линии равной макросейсмической интенсивности) от всех землетрясений магнитудой 3.5 и выше на территории России и в приграничных районах за 1997–2022 гг., то есть за 25 лет после создания карт ОСР-97. В интегральном виде эти результаты представлены на рисунке 1.

Для удобства сравнения площадь теоретических изосейст от реальных землетрясений умножена на 20. Карта ОСР-97-А отвечает вероятности 0.1 превышения соответствующей интенсивности за 50 лет, поэтому площади теоретических изосейст, умноженные на 20, должны были почти совпасть. То, что они оказались как минимум в 4 раза меньше, говорит о примерно четырёхкратном завышении сейсмической опасности на карте ОСР-97. Площади на карте ОСР-2016-А лишь немногим меньше. Получается, что более поздняя карта не исправляет погрешность. При этом опасность на карте ОСР-97-А была занижена для четырёх сильнейших землетрясений 1997–2022 гг. (за исключением землетрясения Тихоокеанского сейсмического пояса с очагами на стыке литосферных плит): Чуйское на Алтае в 2003 г.,  $M=7.3$  (10 баллов в эпицентре против 9 баллов, ожидаемых в соответствии с картой ОСР-97-А), Олюторское на севере Камчатки в 2006 г.,  $M=7.6$  (9–10 против 8 баллов, ожидаемых в эпицентре), Тувинское в 2012 г.,  $M=7.3$  (9 баллов против 8) и Илин-Тасское на севере Якутии в 2013 г.,  $M=6.7$  (8–9 баллов против 7). Эти ошибки отнюдь не умаляют той огромной роли, которую сыграли карты ОСР-97 и их последующие модификации в снижении сейсмической опасности в России, а лишь отражают уровень развития науки, количество и качество накопленных на тот момент данных.

Попробуем разобраться, в чём главные причины ошибок. Поскольку в расчётах теоретической интенсивности применялись те же уравнения макросейсмического поля по Н.В. Шебалину [19], что и при составлении карт ОСР-97, достаточно рассмотреть использованную в ОСР-97 линеаментно-доменно-фокальную (ЛДФ) модель [6] зон ВОЗ, ко-



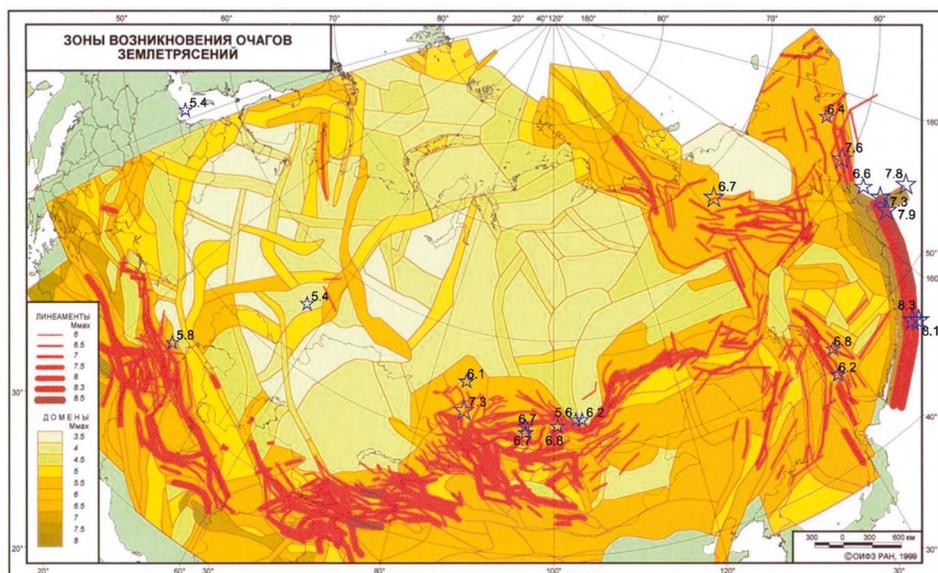
**Рис. 1.** Сопоставление площадей разной балльности на картах ОСП-97 и ОСП-2016 и реальных землетрясений *а* – доли суммарной площади теоретических изосейс 6, 7, 8 и 9 баллов от землетрясений в 1997–2022 гг., умноженные на 20; *б* – доли площадей зон разной балльности (6 и более) на картах ОСП-2016; *в* – на картах ОСП-97; площадь территории России принята за 100%; карты с пометкой “А” отвечает вероятности 0.1 превышения соответствующей интенсивности за 50 лет, карты “В” – 0.05, карты “С” – 0.01

торая была создана большим коллективом авторов под руководством В.И. Уломова. Модель включает в себя комбинацию:

- сейсмичности вдоль линейных структур – сейсмолинеаментов, выделяемых как оси трёхмерных сейсмоактивных разломных структур, которые отражают структурированность сейсмичности и служат основным каркасом ЛДФ-модели;

- сейсмичности на доменах, охватывающих квазиоднородные в тектоническом и геодинамическом отношении объёмы геологической среды и характеризующихся рассеянной сейсмичностью;
- отдельных потенциальных очагов землетрясений.

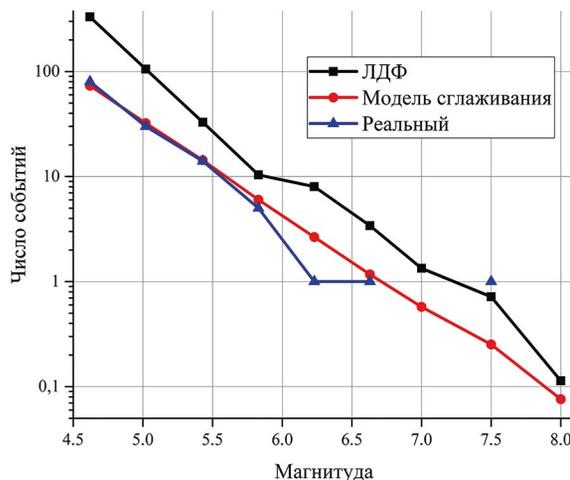
Предполагается, что внутри структур сейсмические события имеют идентичное положение эпицент-



**Рис. 2.** ЛДФ-модель, на основе которой построены карты ОСП-97, и эпицентры сильных землетрясений с 1997 г. Сейсмолинеаменты показаны красными линиями, толщина которых соответствует максимальной магнитуде; максимальные магнитуды для доменов обозначены цветом; звёздочки – эпицентры, цифры рядом – магнитуда

тров и одинаковую удельную повторяемость, равно зависящую от магнитуды. Для каждого элемента определена максимальная возможная магнитуда. Это позволяет сгенерировать синтетический каталог землетрясений на длительный период. ЛДФ-модель, которая легла в основу карт ОСР-97, показана на рисунке 2. На карту также нанесены эпицентры сильных землетрясений, произошедших с 1997 г.

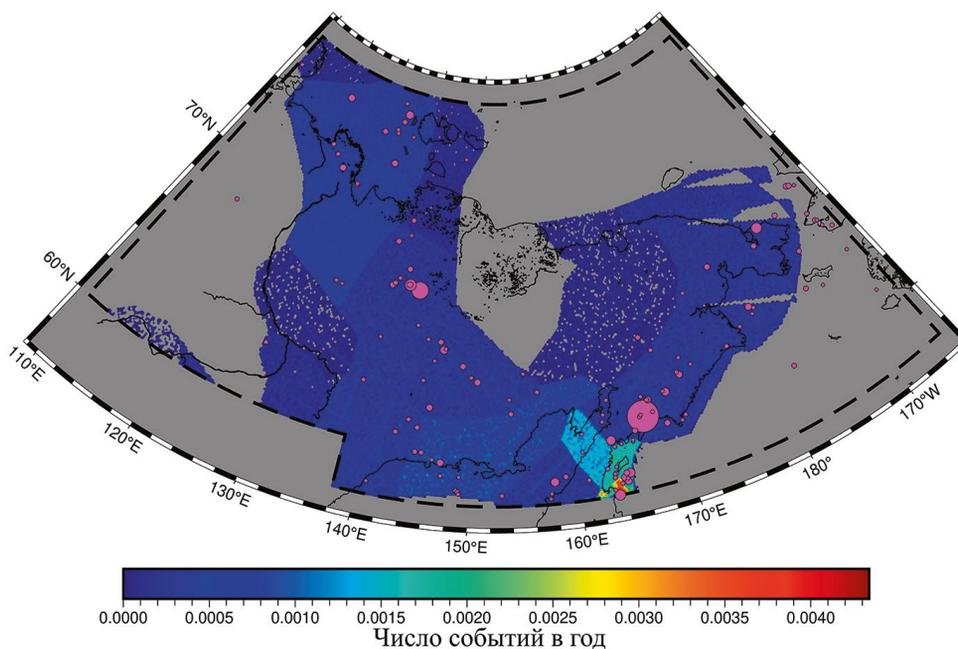
Обращает на себя внимание тот факт, что не все эпицентры сильных землетрясений приурочены к линеаментам, при этом их магнитуда во многих случаях превышает максимальную магнитуду соответствующих доменов. Чтобы разобраться с тем, насколько ЛДФ-модель соответствует реальной сейсмичности, рассмотрим северо-восточную часть России. Именно здесь зафиксированы самые яркие пропуски на карте ОСР-97: Олюторское землетрясение в 2006 г. и Илин-Тасское в 2013 г. Проведён сравнительный анализ магнитудно-частотного распределения, полученного из синтетического каталога на основе ЛДФ-модели, нормированного на период 39 лет, и реального каталога за 1982–2020 гг. [22] (рис. 3). Оказалось, ЛДФ-модель завышает число событий во всех магнитудных диапазонах примерно в 2–3 раза. Этого недостаточно, чтобы объяснить четырёхкратное расхождение на рисунке 1, поэтому мы обратились к пространственному распределению фактических и модельных землетрясений (рис. 4).



**Рис. 3.** Магнитудно-частотное распределение для реального каталога землетрясений восточного сектора российской Арктики за 1982–2020 гг. (треугольники) и ЛДФ-модели, приведённой к эквивалентному периоду 39 лет (квадраты)

Кружки – распределение для модели сглаживания

Из рисунка 4 хорошо видно, что ЛДФ-модель даёт слишком грубое разделение региона на области разной активности. В основном это большие участки, внутри которых плотность эпицентров равномерна. Завышение сейсмической опасности на



**Рис. 4.** Пространственное распределение фактических и модельных землетрясений восточного сектора российской Арктики с  $M \geq 4.6$

Кружки – эпицентры фактических землетрясений за 1982–2020 гг., их размеры возрастают с увеличением магнитуды; цветом показана плотность числа модельных землетрясений в год; использовалась ЛДФ-модель, лежащая в основе ОСР-2016 [23]

больших территориях объясняется одновременным общим завышением ожидаемого числа землетрясений и чрезмерным расширением зон их возможного проявления. Недостатки моделей распространения сейсмических воздействий от потенциальных очагов в рамках общего сейсмического районирования имеют второстепенный характер.

В чём же причины завышения ожидаемого общего числа землетрясений? Считается, что карты ОСР-97 и их модификации являются вероятностными. На самом деле это не совсем так. Во-первых, многие параметры модели не определены на основе анализа данных, а назначены экспертами. Это, в частности, касается границ, максимальной магнитуды доменов, положения и сегментирования сейсмолинементов, применения гипотезы характеристических землетрясений. Во-вторых, карты не используются как вероятностные. Три типа карт (А, В, С), формально соответствующие разной вероятности превышения заданного уровня сейсмического воздействия, считаются нормативными для трёх видов объектов. По-видимому, это следствие двух основных факторов. Во-первых, целью ВАСО было внедрение в методику сокращения ущерба от землетрясений риск-ориентированного подхода с подключением страховых и перестраховочных компаний. В России расчёты сейсмического риска проводились весьма ограниченно, а система страхования от стихийных бедствий лишь начинает формироваться. Во-вторых, на момент создания ОСР-97 надёжные каталоги землетрясений с достаточно низкой представительной магнитудой были составлены для временного интервала менее 20 лет. Ещё один немаловажный фактор заключается в том, что методология ВАСО была разработана К. Корнеллом в 1968 г. именно для системы сейсмолинементов и доменов, считающихся однородными внутри каждого элемента. С развитием вычислительной техники стали использовать синтетические каталоги, и необходимость в модели Корнелла отпала, однако она уже превратилась в догму. Возможное завышение оценок в рамках этой модели неоднократно отмечалось в литературе [24].

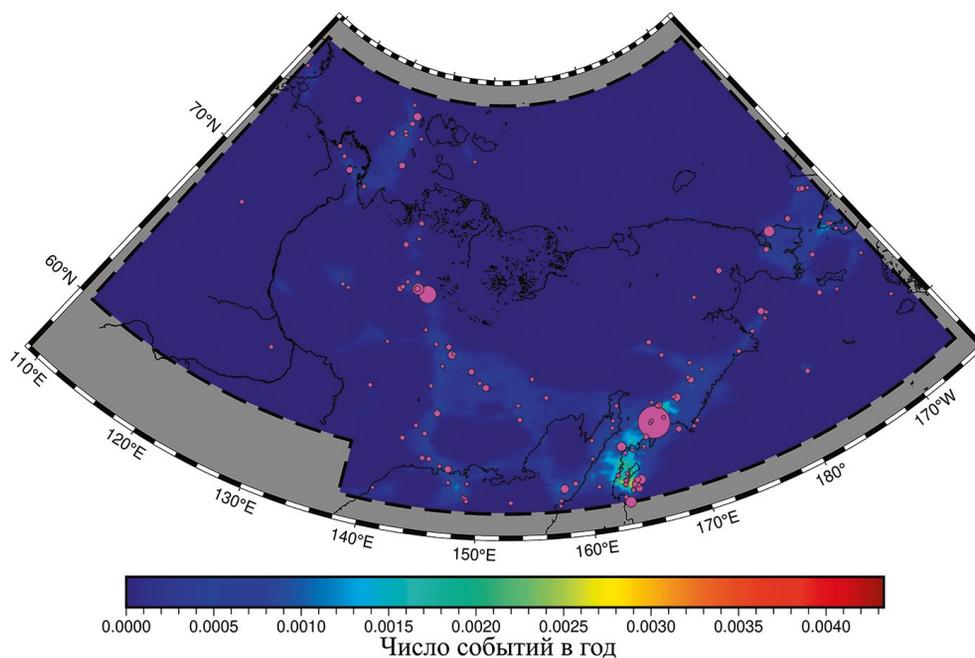
В чём же причины пропусков сильных землетрясений на картах ОСР? Как правило, очаги сильных землетрясений можно приурочить к какому-либо тектоническому разлому, идентифицируемому геологическими и геоморфологическими методами. Поэтому считается, что, помимо мест, где землетрясения уже происходили, они могут случаться на других участках разлома или даже там, где они ещё не фиксировались. Но иногда (см. рис. 2) землетрясение может произойти там, где разлом ещё не установлен. Обычно это объясняют либо плохой изученностью района, либо тем, что расположенный на глубине разлом не проявил себя на поверхности земли или какими-либо аномалиями геофизических полей. Такие эпизоды стимулируют обновле-

ние карт сейсмолинементов, что с каждым разом приводит к увеличению сейсмической опасности. Кроме того, большую роль играет недооценка максимальной возможной магнитуды на сейсмолинементе, определяемой по его длине. В последние годы широко обсуждаются случаи многосегментных разломов, однако в рамках ВАСО пока не предусмотрено решений, учитывающих такую возможность.

**Нужны ли данные о разломах и как можно улучшить оценки в рамках вероятностного подхода?** Зачастую основой карт ОСР служат ЛДФ-модели, опирающиеся на геометрию активных разломов. Однако данные о разломах и их параметры, как отмечалось выше, нередко субъективны, поэтому в зарубежной литературе ведутся споры о том, можно ли для моделирования зон ВОЗ использовать только каталоги землетрясений [24]. Для этого предлагают разные способы сглаживания плотности эпицентров, в основе которых лежит закон Гутенберга—Рихтера [25]: плотность редких, но более сильных землетрясений может оцениваться по плотности более частых, но менее сильных. Закон работает в достаточно больших областях, да и низкие плотности зарегистрированных землетрясений вынуждают к понижению детальности. В результате детальность может оказаться не лучше той, которая достигается в ЛДФ-моделях.

Недавно в работе [26] был предложен высококонтрастный метод сглаживания сейсмичности, в котором соблюдено условие рассмотрения достаточно больших областей для применения закона Гутенберга—Рихтера. Основная идея состоит в том, что территория сканируется кругами большого радиуса (100 км), в границах которых оцениваются параметры закона Гутенберга—Рихтера, но их значения приписываются среднему положению эпицентров, а не центру круга, как это делается обычно. Полученные показатели нормируются на размер круга с учётом фрактальности, что обеспечивает совпадение магнитудно-частотного распределения (МЧР) по всей области и суммы локальных МЧР. Методика получила наименование “модель среднего положения”. На рисунке 5 показано пространственное распределение полученных по этой методике модельных землетрясений для конкретного региона. Видно, что распределение значительно более детальное, чем при ЛДФ-модели. Хорошее совпадение МЧР для всей модели с исходными данными отражено на рисунке 3.

Модель среднего положения может быть легко реализована в виде синтетического каталога землетрясений. Для этого с помощью генератора случайных чисел по интегральному МЧР сначала выбирают время и магнитуду каждого события, а затем — положение эпицентра по локальным значениям плотности эпицентров данной магнитуды, рассчитанным на основе локальных оценок закона Гутенберга—Рихтера.



**Рис. 5.** Пространственное распределение фактических и модельных землетрясений ( $M \geq 4.6$ ) в восточном секторе российской Арктики

Кружки – эпицентры фактических землетрясений за 1982–2020 гг.; цветом показана плотность модельных землетрясений в год; соответствие цветов плотности совпадает с рисунком 4; использована модель среднего положения [26], построенная по событиям с  $M \geq 4.0$  за 1982–2020 гг.

Синтетический каталог можно использовать для количественной проверки соответствия модели реальным землетрясениям с помощью так называемого L-теста [27]. Идея теста состоит в следующем. Территория разбивается на  $k$  ячеек, например, размером  $0.1 \times 0.1$  градусов по широте и долготе, а магнитудный диапазон – на  $m$  интервалов шириной, например, 0.1. По модели или синтетическому каталогу определяются вероятности реализации числа событий  $l = (0, 1, \dots)$  за рассматриваемый период в каждой из  $(k \times m)$  ячеек. Затем по каталогу реальных событий (предполагая их независимость) вычисляется совместная вероятность  $L$  реализации зарегистрированного числа событий в соответствующих ячейках. Результаты сравниваются с распределением аналогичных значений, полученных по отрезкам синтетического каталога и эквивалентным реальному распределению в пределах установленного периода. Чем ближе  $L$  к медиане полученного распределения, тем больше модель соответствует реальным данным. Если  $L$  выходит за доверительные границы распределения, соответствие модели реальным данным должно быть отвергнуто. В рассмотренном случае L-тест показал очень хорошее совпадение. Заметим, что этот результат нетривиален, так как модель строилась по событиям  $M \geq 4.6$ , а тест проводился для событий с  $M \geq 4.6$ , число которых – менее половины зарегистрированных землетрясений. ЛДФ-модель не была подтверждена.

Для расчёта карт ОСР можно использовать синтетический каталог, при этом в модель необходимо включить глубины очагов землетрясений. В ЛДФ-модели для каждого элемента (линеамента или домена) задаётся интервал глубин, в рамках которого распределение считается равномерным. В синтетическом каталоге по модели среднего положения глубина очага рассматривается как случайная величина. Установлено, что в сейсмоопасных регионах России, за исключением Курило-Камчатской зоны, распределение глубин очагов хорошо аппроксимируется распределением Вейбулла. Это позволяет получать локальные оценки одного из параметров распределения по методу среднего положения, если принять, что значение второго параметра однородно. Соответственно, для каждого события в синтетическом каталоге глубина очага определяется с помощью генератора случайных чисел. Для региона на рисунке 5 была построена пробная карта, аналогичная ОСР-97-А. Как и ожидалось, площадь зон 6, 7 и 8 баллов оказалась примерно в 4 раза меньше, чем на карте ОСР-97-А. Расхождение ещё больше для карты ОСР-2015-А, так как на ней после Олюторского и Илин-Тасского землетрясений соответствующие зоны были существенно расширены.

Важное преимущество ВАСО, особенно при использовании синтетического каталога, содержащего условные времена событий, состоит в том, что возможен учёт фактора времени для оценки сейсмического риска. На картах ОСР зоны одной и той

же балльности могут быть образованы как за счёт редких, но сильных событий, так и частых, но более слабых, происходящих в разное время на обширной территории. В первом случае разрушения будут наблюдаться одновременно на большой территории, во втором эффект будет каждый раз локальным и в разное время. При прочих равных условиях совокупный накопленный ущерб в первом варианте будет значительно больше.

Улучшить оценки ВАСО помогает и учёт афтершоков. Афтершоки сконцентрированы в пространстве и времени вблизи отдельных землетрясений за относительно короткий период, охваченный каталогом землетрясений. Использование полного каталога приводило бы к локальному завышению рисков вокруг эпицентров землетрясений. Поэтому при проведении оценок обращаются к каталогам, из которых афтершоки удалены. Однако это влечёт за собой занижение общей сейсмической опасности, поскольку не учитываются даже сильные афтершоки, например, второе землетрясение 6 февраля 2023 г. в Турции. Разрушения от сильных повторных толчков могут быть очень существенными, поскольку в результате первого толчка нарушается конструктивная прочность зданий. Чтобы учесть опасность афтершоков в мировой практике применяется стохастическое моделирование на основе широко известной модели ETAS (Epidemic-type aftershock sequences) [28]. Стандартная модель ETAS обычно завышает количество афтершоков, но её модификация на основе закона продуктивности [29] предсказывает в синтетическом каталоге примерно такое же их количество, которое было удалено из каталога фактических землетрясений [30].

Один из важных возможных недостатков методики составления карт ОСР-97 и их модификаций состоит в применении гипотезы характеристических землетрясений, в соответствии с которой повторяемость сильнейших событий на разломах может быть многократно выше, чем по закону Гутенберга–Рихтера. В последние годы эта гипотеза всё больше подвергается критике. Видимый избыток сильнейших землетрясений объясняется тем, что магнитудно-частотное распределение исследуется в узких пространствах. Наоборот, находится всё больше подтверждений закона Гутенберга–Рихтера в областях, размер которых по всем направлениям пятикратно превышает очаг самого крупного землетрясения. Это подводит к определению максимально возможной магнитуды в региональном масштабе. Обычно эпизодов землетрясений на таких больших площадях достаточно, чтобы оценить максимальную возможную магнитуду статистическими методами [31]. Но тогда возникает вопрос: где именно в пределах региона возможны сильнейшие землетрясения? Эта задача, на наш взгляд, должна решаться независимо ввиду масштабности пространства и времени для таких событий. Один из возможных способов, кото-

рый развивается уже около полувека, — распознавание мест предполагаемого возникновения сильных землетрясений [32].

Весьма сложная и малоизученная проблема вероятностных оценок — нестационарность сейсмических процессов и интервалов времени, в которых сейсмическую активность можно считать стабильной. Учёные постепенно приходят к консенсусу, что ВАСО может давать более или менее надёжные прогнозы лишь на 50 лет. Но даже за такой период вариации сейсмической активности могут быть значительными. Это оправдывает исследования по средне- и долгосрочному прогнозу землетрясений, которые позволяют перейти к зависящим от времени оценкам сейсмической опасности. Такие оценки становятся всё более популярными в мире. Недавно была предложена простая и наглядная методика [33] использования статистики успехов и неудач какого-либо прогнозного метода для изменения во времени параметров модели зон ВОЗ, представленной аналогично модели среднего положения. Параметры меняются неравномерно по пространству и магнитуде в зависимости от значения управляющего критерия, который учитывается в прогнозе. Другие способы учёта фактора времени — исследование временных вариаций полей деформаций и напряжений. Многообещающими, особенно в высокоподвижных районах Курило–Камчатской зоны субдукции, являются геодинамические исследования на основе ГНСС-геодезии (глобальные навигационные спутниковые системы) [34], спутниковой интерферометрии [35], а также тектонофизические методы [36].

\* \* \*

Использование в строительной отрасли условно вероятностных карт ОСР как детерминистских вполне оправдано. Строителям не важно, с какой вероятностью в данном месте за 50 лет возможны сотрясения силой 8 баллов. Они хотят получить однозначный ответ на вопросы: случится ли сотрясение силой в 8 баллов в ближайшие 50 лет и нужно ли применять сейсмоусиливающие технологии? Но детерминистский подход всегда основан на заключении экспертов, что неизбежно приводит к соблазну завязать реальную сейсмическую опасность, дабы избежать ответственности в случае её недооценки. Нельзя исключать и лоббирование определённых экспертных решений со стороны заинтересованных лиц или компаний. Завышение сейсмической опасности приводит к удорожанию строительства, иногда весьма значительному. В результате неоправданные издержки фактически наносят косвенный ущерб от несостоявшихся землетрясений. Очевидно, что избежать расходов на сейсмостойкое строительство нельзя, но можно их регулировать. Если построить адекватные модели сейсмического риска, то всегда можно рассчитать экономически допустимый объём средств, выделяемый на сейсмоусиле-

ние в пределах какого-то предприятия, населённого пункта, района и т.д. А вот куда именно направлять эти средства, нужно решать на основе детерминистских подходов, включая моделирование очагов конкретных землетрясений и сценариев воздействия на конкретные объекты.

Детерминистский подход применяется при определении сейсмической опасности, в частности для атомных электростанций. Для подобных объектов должна приниматься во внимание даже очень небольшая вероятность сильных землетрясений ( $10^{-5}$ – $10^{-6}$  в год). Уверенно оценить такую низкую вероятность, например по палеосейсмическим данным, невозможно, поэтому оценка в любом случае будет экспертной, то есть детерминистской.

Таким образом, необходимо параллельно развивать вероятностное и детерминистское направления оценки сейсмической опасности. С учётом мирового опыта и потребностей России детерминистский подход, на наш взгляд, целесообразно реализовывать на уровне детального сейсмического районирования (ДСР), в основном для обеспечения строительства в высокосейсмичных регионах, включая ответственные объекты (для которых в настоящее время применяются карты В и С). Основные направления развития подхода – построение моделей очагов землетрясений, затухания сейсмических волн, генерации и распространения сейсмических волн в ближней зоне, учёта локальных грунтовых условий, создание синтетических акселерограмм, баз данных фактических записей сильных движений. Кроме того, нужно восстанавливать информацию о прошлых землетрясениях, проводить палеосейсмические исследования.

Вероятностный подход должен опираться на максимально объективные и подробные данные, поэтому нужны наиболее полные и однородные каталоги землетрясений. Объём необходимой информации должен обеспечиваться за счёт доступных и открытых баз данных и алгоритмов их обработки. На стыке вероятностного и детерминистского подходов находятся высокоточные геодинамические исследования с применением спутниковых технологий (ГНСС, спутниковая интерферометрия).

Проблема нестационарности сейсмических процессов даже на отрезках в десятки лет актуализирует анализ сейсмической опасности, зависящий от времени. Качество различных алгоритмов прогноза землетрясений пока не даёт оснований для оперативного реагирования. Но если оперировать статистикой успехов и неудач работы алгоритма, эти результаты можно использовать для включения в оценки ВАСО фактора времени.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает признательность С.А. Перетокину за помощь в составлении синтетического каталога землетрясений по ЛДФ-модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.iii.org/fact-statistic/facts-statistics-global-catastrophes>
2. Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012, vol. 62, iss. 3, pp. 927–935.
3. Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Скоркина А.А. Почему необходимы новые подходы к оценке сейсмической опасности? // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. № 1. С. 91–97.  
*Shebalin P.N., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Skorkina A.A.* Why are new approaches to seismic hazard assessment required? // *Doklady Earth Sciences*. 2022, vol. 507, no. 1, pp. 930–935. (In Russ.)
4. Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1968, vol. 58, iss. 5, pp. 1583–1606.
5. Giardini D. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) – 1992/1999 // *Annali di Geofisica*. 1999, vol. 42, iss. 6, pp. 957–974.
6. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 4 листа / 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, 1999.  
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. Moscow: United Institute of Physics of the Earth named after O.Yu. Schmidt, Russian Academy of Sciences, 1999. (In Russ.)
7. Rikitake T. Classification of earthquake precursors // *Tectonophysics*. 1979, vol. 54, no. 3–4, pp. 293–309.
8. Федотов С.А. Закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Вопросы инженерной сейсмологии. 1965. № 10. С. 66–93.  
*Fedotov S.A.* Patterns of distribution of strong earthquakes in Kamchatka, the Kuril Islands and North-East Japan // *Problems of Engineering Seismology*. 1965, no. 10, pp. 66–93. (In Russ.)
9. Bakun W.H., Lindh, A.G. The Parkfield, California, earthquake prediction experiment // *Science*. 1985. vol. 229, pp. 619–624.
10. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of  $1/f$  noise // *Physical Review Letters*. 1987, vol. 59, no. 4, pp. 381–384.
11. Turcotte D.L., Smalley Jr. R.F., Solla S.A. Collapse of loaded fractal trees // *Nature*. 1985, vol. 313, no. 6004, pp. 671–672.
12. Olami Z., Feder H.J.S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular

- automaton modeling earthquakes // *Physical Review Letters*. 1992, vol. 68, no. 8, pp. 1244–1247.
13. *Geller R.J., Jackson D.D., Kagan Y.Y., Mulargia F.* Earthquakes Cannot Be Predicted // *Science*. 1997, vol. 275, no. 5306, p. 1616.
14. *Кособоков В.Г., Щепалина П.Д.* Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 43–52.  
*Kossobokov V.G., Shchepalina P.D.* Times of increased probabilities for occurrence of world's largest earthquakes: 30 years hypothesis testing in real time // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020, vol. 56, no. 1, pp. 36–44. (In Russ.)
15. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2011. № 2. С. 53–59.  
*Saltykov V.A.* A statistical estimate of seismicity level: the method and results of application to Kamchatka // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011, vol. 5, no. 2, pp. 123–128. (In Russ.)
16. *Spassiani I., Falcone G., Murru M., Marzocchi W.* Operational Earthquake Forecasting in Italy: validation after 10 years of operativity // *Geophysical Journal International*. 2023, vol. 234, no. 3, pp. 2501–2518.
17. *Heaton T.* A Model for a Seismic Computerized Alert Network // *Science*. 1985, vol. 228, no. 4702, pp. 987–990.
18. *Finazzi F., Fassò A.* A statistical approach to crowd-sourced smartphone-based earthquake early warning systems // *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2016, vol. 31 (7), pp. 1649–1658.
19. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времён до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. New catalogue of strong earthquakes on the territory of the USSR from ancient times to 1975. / Eds. N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. Moscow: Nauka, 1977. (In Russ.)
20. *Кособоков В.Г., Некрасова А.К.* Карты Глобальной программы оценки сейсмической опасности (GSHAP) ошибочны // *Вопросы инженерной сейсмологии*. 2011. № 1. С. 65–76.  
*Kossobokov V.G., Nekrasova A.K.* Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) maps are misleading // *Problems of Engineering Seismology*. 2011, vol. 38, no. 1, pp. 65–76. (In Russ.)
21. *Castaños H., Lomnitz C.* PSHA: is it science? // *Engineering Geology*. 2002, vol. 66, iss. 3–4, pp. 315–317.
22. *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, p. 5010.
23. *Уломов В.И., Богданов М.И.* Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населённых пунктов, расположенных в сейсмоактивных 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 // *Ingenerynye izyskaniya*. 2016, no. 7, pp. 49–60. (In Russ.)
24. *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.
25. *Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944, vol. 34 (4), pp. 185–188.
26. *Vorobieva I., Grekov E., Krushelnitskii K. et al.* High resolution seismicity smoothing method for seismic hazard assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024, vol. 24, no. 1, ES1003.
27. *Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A. et al.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // *Doklady Earth Sciences*. 2024, vol. 515, pp. 514–525.
28. *Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D.* Analyzing earthquake clustering features by using stochastic reconstruction // *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, B05301.
29. *Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake Productivity Law // *Geophysical Journal International*. 2020, vol. 222, pp. 1264–1269.
30. *Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N.* Modeling and prediction of aftershock activity // *Surveys in Geophysics*. 2022, vol. 43, no. 2, pp. 437–481.
31. *Pisarenko V.F., Rodkin M.V.* Approaches to Solving the Maximum Possible Earthquake Magnitude ( $M_{\max}$ ) Problem // *Surveys in Geophysics*. 2022, vol. 43, pp. 561–595.
32. *Гвишиани А.Д., Соловьёв А.А., Дзобоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: актуальный обзор // *Физика Земли*. 2020. № 1. С. 5–29.  
*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. (In Russ.)
33. *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.
34. *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.
35. *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, pp. 102–110. (In Russ.)

36. *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. (In Russ.)

## MODERN APPROACHES TO REDUCING DAMAGE FROM EARTHQUAKES

**P.N. Shebalin<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: shebalin@mitp.ru*

The experience of the catastrophic earthquake on February 6, 2023 in Turkey reminds us of the need to improve the seismic hazard reduction system in Russia as well. The main protective measure is earthquake-resistant construction based on General Seismic Zoning (GSZ) maps. The current maps, as in global practice, are based on a probabilistic seismic hazard assessment. Over the 25 years of use in Russia, GSZ maps have generally justified themselves. Errors made, both in the direction of underestimating the hazard in the areas of several strong earthquakes and overestimating the hazard in large areas, were inevitable at the level of data available at the time the maps were created.

The work analyzes the most likely causes of errors in the GSZ-maps, ways to overcome them, argues for the need to introduce a risk-based approach to reduce the total economic damage from earthquakes, including unjustified costs for anti-seismic reinforcement of structures, discusses the different goals of probabilistic and deterministic approaches to assessing seismic hazard.

**Keywords:** seismic hazard assessment, earthquake forecast, general seismic zoning, earthquake early warning systems.