

УДК 550.343.6

СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2025 г. П. Н. Шебалин^{a, b, *}, А. Д. Гвишиани^{a, c}, П. А. Малютин^b, Е. М. Греков^b, А. О. Антипова^{a, b}, И. А. Воробьева^{a, b}, Б. А. Дзедобоев^{a, c}, Б. В. Дзеранов^a

^aГеофизический центр РАН, ул. Молодежная, 3, Москва, 119296 Россия

^bИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^cИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия
*e-mail: p.n.shebalin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2024 г.

После доработки 15.10.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

В работе построен синтетический каталог землетрясений Восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации. Он воспроизводит и моделирует ключевые свойства каталога фактически произошедших землетрясений в регионе. На региональном уровне выполняется закон повторяемости землетрясений разной магнитуды Гутенберга–Рихтера как для каталога в целом, так и каталога основных толчков, в котором удалены афтершоки. Воспроизводятся локальные значения параметров этого закона. Синтетический каталог включает афтершоки, при этом соблюдаются локальные соотношения числа афтершоков и общего числа землетрясений, оцененные по каталогу реальных событий. В качестве модели пространственного распределения сильнейших землетрясений в регионе ($M \geq 5.5$) используются результаты распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений по методике FCAZ. Проведены предварительные расчеты нормативной интенсивности для сравнения трех вариантов синтетического каталога (полная модель, без учета афтершоков, без учета результатов FCAZ распознавания и афтершоков).

Ключевые слова: сейсмический режим, модель, синтетический каталог землетрясений, верификация модели, L-тест, Восточный сектор АЗРФ, распознавание мест возможного возникновения землетрясений, FCAZ, афтершоки, продуктивность землетрясений

DOI: 10.31857/S0203030625010012, EDN: GJAVEQ

ВВЕДЕНИЕ

Главным инструментом минимизации ущерба от землетрясений в настоящее время практически во всех сейсмоопасных регионах мира является сейсмостойкое строительство на основе карт сейсмического районирования. Первоначально такие карты строились на детерминистском принципе (детерминистический анализ сейсмической опасности, ДАСО): считалось, что если в каком-то месте землетрясение уже произошло, то землетрясения такой же силы в этом же месте могут произойти снова. Поэтому основной задачей детерминистского

подхода было определить места и силу землетрясений прошлого, а также определить другие возможные места новых землетрясений. Была принята парадигма активных тектонических разломов в качестве сейсмогенерирующих структур. Поскольку считалось, что очаг сильного землетрясения формируется по уже готовому разлому, предполагалось, что максимальная магнитуда землетрясения должна соответствовать предельному размеру очага, ограниченного размерами разлома. Но внутриконтинентальные землетрясения происходят в одном и том же месте крайне редко, поэтому

для целей общегражданского строительства необходимо было как-то ограничить возможные места сильных землетрясений с учетом их повторяемости.

Параллельно, с развитием системы страхования от последствий землетрясений, возникла необходимость введения вероятностных оценок силы воздействия от землетрясений в заданных точках или на заданных объектах. Так возник вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. В России такой подход получил сокращение ВАСО (вероятностный анализ сейсмической опасности), в международной литературе — PSHA (probabilistic seismic hazard assessment). Несмотря на критику этого подхода со стороны большого числа ученых, оценки сейсмической опасности, рассчитанные с помощью этого подхода, остаются нормативными в большинстве стран, в которых есть сейсмоопасные регионы, включая Россию.

Более того, этот подход повсеместно используется именно в том виде, в котором он был разработан в 1960–1970 гг. и внедрен по всему миру в 1990-е гг. в рамках программы GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program) [Giardini et al., 1999] и затем GEM (Global Earthquake Model). По сути, это лишь надстройка над детерминистским подходом с добавлением элементов оценки вероятности сейсмических проявлений на заданном интервале времени. Как и в детерминистском анализе, этот подход включает решение двух независимых задач: 1) определение потенциальных очагов будущих землетрясений (в вероятностном анализе с учетом их средней повторяемости), 2) построение модели затухания сейсмических волн от очага землетрясения до конкретного объекта или точки на поверхности Земли.

По-прежнему основными сейсмогенерирующими структурами считаются активные разломы. Фактор времени добавлен путем включения главного элемента ВАСО — закона Гутенберга–Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944], который устанавливает подобие числа землетрясений в единицу времени для землетрясений разной магнитуды. Этот закон позволяет по статистике менее сильных землетрясений оценивать повторяемость более сильных.

Фактически любые модели затухания могут применяться как в ВАСО, так и в ДАСО.

Первоначально использовались простейшие модели макросейсмического поля Блейка–Шебалина [Шебалин, 2003], которые устанавливают соотношение между интенсивностью сотрясений в баллах (шкалы Mercalli, MSK-64) и магнитудой, глубиной очага и эпицентральной расстоянием. Одновременно с макросейсмической шкалой стали применяться инструментально измеряемые величины (пиковое ускорение грунта, PGA, Peak Ground Acceleration; пиковая скорость грунта, PGV, Peak Ground Velocity). В современных условиях для инженерных целей помимо пиковых значений часто используются спектральные параметры, позволяющие рассчитывать отклик сооружений на воздействия сейсмических волн разной частоты.

Быстрый рост объемов и качества наблюдательной базы, совершенствование вычислительной техники привели за последние десятилетия к значительному прогрессу в решении второй задачи: воздействия на объекты от землетрясений с конкретными параметрами можно рассчитать достаточно точно. А вот решение первой задачи — определения мест и повторяемости будущих землетрясений разной силы — по-прежнему часто приводит к значительным ошибкам. Многие сильнейшие землетрясения происходят в неожиданных местах [Wyss et al., 2012; Шебалин, 2024], но при этом на больших территориях оценки вероятной силы воздействия от землетрясений за определенный период оказываются завышенными [Шебалин и др., 2022; Шебалин, 2024].

В России в настоящее время используется комплект карт Общего сейсмического районирования ОСР-2015, которые являются нормативными при строительстве в сейсмоопасных районах. На картах обозначены зоны нормативной балльности, рассчитанной для разных интервалов времени. Карта А представляет зоны ожидаемой в течение 50 лет интенсивности воздействия землетрясений по шкале МСК-64 с вероятностью 10%, карта В — с вероятностью 5%, карта С — с вероятностью 1%. Карты ОСР-2015 в значительной степени воспроизводят карты ОСР-97 [Комплект ..., 1999], впервые построенные в рамках ВАСО. Главные отличия, помимо включения территории Крыма, состоят в увеличении нормативной балльности в восточной части Российской Арктики: на севере Якутии

и на севере Камчатки. Эти изменения были вызваны Олюторским землетрясением 2006 г. в Корякии и Иллин-Тасским землетрясением 2013 г. на севере Якутии. Оба землетрясения можно считать пропусками на карте ОСР-97, поскольку их воздействие оказалось выше ожидаемого примерно на 2 балла [Шебалин, 2024]. Частично эти пропуски можно оправдать недостаточной изученностью малонаселенных районов, в которых произошли землетрясения. Помимо карт ОСР-97 и ОСР-2015 короткое время действовал также комплект карт ОСР-2016 [Пояснительная ..., 2016]. Для рассматриваемого региона эти карты отличаются как от карт ОСР-97, так и от карт ОСР-2015 (рис. 1). Нормативная балльность в регионе несколько снижена по сравнению с ОСР-2015. Тем не менее отличия трех поколений карт недостаточны, чтобы компенсировать общее завышение нормативной балльности на больших территориях, обнаруженное в работах [Шебалин и др., 2022; Шебалин, 2024]. Таким образом, вопрос о более точной оценке сейсмической опасности в регионе остается актуальным.

В основу трех поколений вероятностных карт ОСР легла линейно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон ВОЗ (возможных очагов землетрясений) [Ulomov, 1999]. Идеология моделей типа ЛДФ была предложена Корнеллом в 1968 г. [Cornell, 1968]: комбинация линейных и площадных структур позволяла ему получать аналитические выражения для перехода от модели зон ВОЗ к модели сотрясаемости. Позднее появилась возможность замены аналитических

выражений Корнелла расчетами с помощью метода Монте-Карло. При таком подходе формируется синтетический каталог землетрясений, реализующий повторяемость землетрясений разной магнитуды в соответствии с параметрами закона Гутенберга–Рихтера, установленными для элементов ЛДФ-модели, а величина нормативной интенсивности определяется путем многократной реализации синтетического каталога на таких интервалах и пересчетом по формулам затухания.

Все три поколения карт ОСР, о которых говорилось выше, построены с помощью синтетического каталога. Представление оценок сейсмической опасности в виде комплекта карт нормативной балльности удобно и привычно для целей строительства. Но для экономических расчетов, включая оценки сейсмического риска ущерба от землетрясений, ценность представляет и собственно синтетический каталог, если в него включен фактор времени. Это связано с тем, что одна и та же нормативная балльность в какой-либо точке на карте ОСР может достигаться как небольшим числом очень редких сильных землетрясений, так и большим числом более слабых землетрясений. На карте ОСР эти два варианта неразличимы, но при расчетах сейсмического риска разница между двумя вариантами очень велика [Шебалин и др., 2024].

Модели типа ЛДФ давно подвергаются критике, главным образом из-за их субъективного характера [Gerstenberger et al., 2020]. Альтернативой моделям типа ЛДФ являются модели

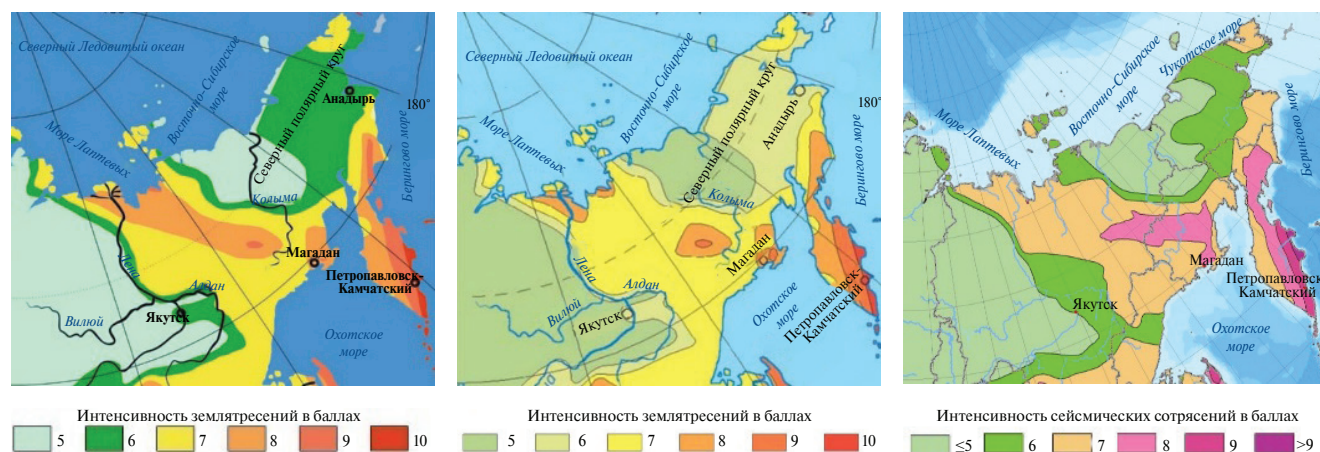


Рис. 1. Фрагменты карт ОСР для Востока Российской Арктики. Показаны фрагменты карт ОСР-97А (слева), ОСР-2015А (в центре), ОСР-2016А (справа).

сглаженной сейсмичности [Akinci et al., 2018; Helmstetter, Werner, 2012; Stock, Smith, 2002], учитывающие закон Гутенберга–Рихтера. Этот подход обеспечивает гораздо более точные в пространственном отношении оценки параметров по сравнению с моделями типа ЛДФ, но требует значительно большего количества зарегистрированных землетрясений в широком диапазоне магнитуд для построения детальной и точной модели сейсмического режима [Ризниченко, 1980]. Главная проблема в таких моделях — “размазывание” сейсмической активности, почти неизбежное при использовании процедуры сглаживания. В результате в наиболее опасных местах активность оказывается заниженной, а на краях активных зон завышенной.

Проблема усугубляется тем, что при нормировании активности на площадь, как правило, не учитывается фрактальная структура пространственного распределения эпицентров [Kossobokov, Mazhkenov, 1994; Spada et al., 2011]. Значительный прогресс в построении моделей сглаживания был достигнут с появлением высококонтрастного метода среднего положения (МСП) [Vorobieva et al., 2024; Shebalin et al., 2024], разработанного в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН) в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 “Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска”. В отличие от практически всех моделей сглаживания сейсмичности, в МСП значения параметров приписываются среднему положению эпицентров землетрясений, использованных в расчетах (а не центру круга), а площадная нормировка производится с учетом фрактальности.

В расчетах ОСР при оценке параметров ЛДФ-модели по реальному каталогу землетрясений афтершоки исключались из рассмотрения. Оставшиеся землетрясения обычно называются фоновыми. Такой подход основан на гипотезе, что повторяемость фоновых землетрясений в окрестности каждой точки в рассматриваемом регионе не изменяется во времени [Gardner, Knopoff, 1974]. Афтершоки концентрируются в пространстве и времени вблизи отдельных землетрясений и их число обычно сопоставимо с числом фоновых

землетрясений. Использование полного каталога, без удаления афтершоков (так называемой процедуры декластеризации), неизбежно приводило бы к локальному завышению опасности вблизи эпицентров сильных землетрясений.

С другой стороны, игнорирование афтершоков может приводить к недооценке сейсмической опасности [Шебалин, 2024]. В рамках проекта РНФ № 20-17-00180 в ИТПЗ РАН была предложена “симметричная” процедура декластеризации каталога и моделирования последовательности афтершоков в синтетическом каталоге землетрясений [Shebalin et al., 2024]. Декластеризация осуществляется по методу Заляпина [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013], в котором строятся цепочки афтершоков разных поколений, реализующих модель ETAS [Zhuang et al., 2002]. При создании синтетического каталога сначала генерируются фоновые события, а затем по модели ETAS генерируются афтершоки. Используется вариант модели ETAS-е, в котором учитывается экспоненциальный закон продуктивности [Baranov et al., 2019; Shebalin et al., 2020]. Применение метода Заляпина для декластеризации каталога и модели ETAS-е в значительной степени компенсирует возможные ошибки декластеризации [Baranov et al., 2022]. В случае, если число фоновых событий при декластеризации занижено, оказывается завышенным число афтершоков. Это приводит к увеличению средней продуктивности землетрясений, благодаря чему при моделировании по модели ETAS-е генерируется большее число афтершоков, частично компенсирующее недостаток фоновых событий.

В зонах высокой сейсмичности главную опасность представляют сильные землетрясения. Они происходят очень редко, но их воздействие распространяется на большие территории. Одна из важнейших задач в моделях сглаженной сейсмичности состоит в том, чтобы максимально сузить области, в которых могут возникать сильные землетрясения [Gerstenberger et al., 2020]. Без решения этой задачи зона возможного возникновения сильных землетрясений “размазывается”, вследствие чего в зонах, где сильные землетрясения действительно могут возникнуть, их ожидаемая повторяемость оказывается заниженной, а по краям этих зон завышенной. Один из возможных способов

сужения областей, в которых ожидаются сильные землетрясения, — использование части модели ЛДФ, определяющей линейные структуры. Этот подход, однако, остается весьма субъективным. Кроме того, он неизбежно приведет к ошибкам типа пропуска цели, поскольку сильные землетрясения довольно часто происходят далеко от уже известных активных разломов и тем более от линеаментов, определяющих в ЛДФ-модели места возможных сильных землетрясений. Другой возможный подход — это использование результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений по методике EPA (Earthquake Prone Areas) [Гвишиани и др., 2020]. Именно этот подход было предложено использовать в методике создания синтетического каталога землетрясений, разработанной в ИТПЗ РАН в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 [Shebalin et al., 2024]. Выделенные и распознанные по геолого-геофизическим признакам морфоструктурные узлы определяют в синтетическом каталоге возможные места сильных землетрясений. Эпицентры таких землетрясений сосредоточены вблизи центров узлов, но могут удаляться в пределах 30 км. Распределение направлений при этом не однородно, а определяется геометрией близлежащих активных разломов, которые находятся по базе данных Геологического института РАН (ГИН РАН) [Zelenin et al., 2022]. В данной работе мы реализуем третий возможный подход, используя результаты FCAZ-распознавания [Dzeboev et al., 2021] мест возможного возникновения сильных землетрясений в рассматриваемом регионе [Gvishiani et al., 2022b].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И КЛЮЧЕВЫЕ ПРИНЦИПЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

В данной работе мы ставим задачу построения синтетического каталога землетрясений в Восточном секторе Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) на условный период 20 000 лет, воспроизводящего основные свойства реального каталога. К таким свойствам относятся:

- региональная повторяемость (рассчитанная для всего региона в единицу времени) фоновых землетрясений во всех интервалах магнитуды;

- региональное соотношение числа афтершоков и фоновых событий;
- локальная повторяемость (оцененная для малой окрестности каждой точки рассматриваемой территории на единицу площади в единицу времени) фоновых землетрясений (без учета афтершоков);
- локальные соотношения числа фоновых землетрясений разной магнитуды (параметр b закона Гутенберга—Рихтера);
- локальные свойства группирования землетрясений;
- пространственное распределение эпицентров сильных землетрясений.

Методика построения синтетического каталога землетрясений с такими свойствами была недавно разработана в ИТПЗ РАН в рамках проекта РНФ № 20-17-00180 “Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска” [Shebalin et al., 2024]. Ключевые принципы этого подхода следующие:

- на первом этапе генерации синтетического каталога формируется каталог фоновых событий с магнитудой $M \geq M_0$ (порог генерации выбирается исходя из целей создания синтетического каталога);
- время каждого фонового события генерируется в соответствии с распределением Пуассона с параметром, равным региональной повторяемости числа событий с $M \geq M_0$;
- магнитуда каждого события генерируется в соответствии с региональным магнитудно-частотным распределением [Shebalin et al., 2024];
- координаты эпицентра каждого фонового события генерируются по модели распределения локальной повторяемости землетрясений данной магнитуды; если магнитуда события превышает заданный порог M_{strong} , то используется модель пространственного распределения сильных землетрясений [Shebalin et al., 2024];
- для каждого фонового землетрясения по модели ETAS-e [Shebalin et al., 2020] генерируется иерархическая последовательность афтершоков; такая последовательность может быть пустой и не содержать ни одного события.

Для проверки выполнения в синтетическом каталоге свойств каталога фактически зарегистрированных землетрясений проводится ряд тестов.

МЕТОД

Здесь мы используем методику работы [Shebalin et al., 2024]. Она включает: 1) разделение каталога землетрясений на фоновые события и афтершоки; 2) построение высококонтрастной модели параметров сейсмического режима фоновых землетрясений; 3) оценку параметров афтершоков: региональную оценку параметров c и p закона Омори–Утсу и параметра b закона Гутенберга–Рихтера, а также локальные оценки средней продуктивности; 4) генерацию синтетического каталога фоновых событий; 5) генерацию последовательностей афтершоков и формирование полного синтетического каталога; 6) верификацию синтетического каталога. Важным элементом этой методики является ограничение возможных мест сильных землетрясений. В работе [Shebalin et al., 2024] предлагается использовать для этого результаты распознавания по методике ЕРА [Гельфанд и др., 1972; Гвишиани и др., 2020]. В данной работе ограничения вводятся в соответствии с результатами FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Первые два и последний элемент были описаны и реализованы для рассматриваемого региона в работе [Воробьева и др., 2024], где было приведено детальное обоснование применяемых методик. Здесь мы приведем их сокращенное описание, остановившись подробнее на остальных элементах.

Разделение каталога землетрясений на фоновые события и афтершоки

Используемый здесь метод ближайшего соседа Заляпина–Бен-Зиона [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013] для декластеризации каталога по сути является обратным относительно метода генерации афтершоков в синтетическом каталоге по модели ETAS-е. В методе устанавливается иерархия последовательности афтершоков, в которой однозначно выделяются афтершоки фоновых событий, афтершоки афтершоков, их афтершоки и т.д. В модели

ETAS-е такие иерархические последовательности синтезируются. Таким образом обеспечивается максимальное соответствие “афтершоковой” части в синтетическом и реальном каталогах.

В методе Заляпина–Бен-Зиона выделяются пары связанных событий, одно из которых считается триггером (или “родителем”), а другое инициируемым событием (или “потомком”); потомок всегда возникает позже родителя. Каждое событие может иметь несколько потомков, но не более одного родителя. Степень связанности событий в пространстве–времени–магнитуде для событий с индексами i и j определяется значениями функции близости [Baiesi, Paczuski, 2004]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0, \\ +\infty, & t_{ij} \leq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где t_{ij} – время между событиями (сутки), r_{ij} – расстояние между эпицентрами, d_f – фрактальная размерность пространственного распределения землетрясений, b – параметр закона Гутенберга–Рихтера (b -value), m_i – магнитуда события i . События считаются связанными, если $\eta_{ij} \leq \eta_0$.

Пороговая величина η_0 оптимально разделяет независимые и связанные события. Значение η_0 определяется по представленному в работе [Shebalin et al., 2020] методу, в котором распределение функции близости для независимых событий моделируется путем случайного перемешивания времен событий относительно их координат гипоцентра и магнитуд. Каталог фоновых событий формируется из событий в исходном каталоге, для которых значение функции близости относительно любого события $\eta_{ij} > \eta_0$ (то есть событие не имеет “родителя”).

Построение модели параметров сейсмического режима фоновых землетрясений

В отличие от методики построения карт ОСР-97, ОСР-2015 и ОСР-2016, мы не используем данные об активных разломах, опираясь исключительно на данные каталога землетрясений. Более того, даже результаты распознавания возможных мест сильных землетрясений

по методике FCAZ [Gvishiani et al., 2022b], используемые в данной работе, также основаны исключительно на данных каталога землетрясений.

Для построения локальных оценок параметров закона Гутенберга–Рихтера использован метод среднего положения (МСП) [Vorobieva et al., 2024; Shebalin et al., 2024]. Регион сканируется кругами с постоянным радиусом R с центрами в узлах регулярной сетки с шагом D по широте и долготе. В каждом круге подсчитывается число событий $N_{i,j}$ с $M \geq M_c$ (M_c – представительная магнитуда) или оценивается значение параметра b закона Гутенберга–Рихтера. Для оценки параметра b диаметр кругов должен как минимум в 5 раз превышать размер очага сильнейшего события в исследуемом диапазоне магнитуды [Крушельницкий и др., 2024]. Радиус круга для подсчета числа событий с $M \geq M_c$ обычно выбирается вдвое меньшим.

Главная особенность МСП состоит в том, что значения оцениваемого параметра приписываются не центру круга, а среднему положению землетрясений из выборки. Вторая важная особенность – учет неравномерности пространственного распределения эпицентров (фрактальности). Для подсчета числа событий в пространственной ячейке в единицу времени $\lambda_{i,j}$ используется следующая нормировка [Vorobieva et al., 2024]:

$$\lambda_{i,j} = \frac{1}{T} N_{i,j} \frac{S_{cell}}{S_{circle}}, \quad (2)$$

где $S_{circle} = R^{d_f^b} \frac{\pi \frac{d_f^b}{2}}{\Gamma\left(1 + \frac{d_f^b}{2}\right)}$ и $S_{cell} = D^{d_f^b} \cos(\varphi)$ –

площади круга и ячейки в d_f^b -мерном пространстве; φ – широта центра ячейки; Γ – гамма-функция; R – радиус круга; d_f^b – фрактальная размерность пространственного распределения эпицентров фоновых землетрясений. В некоторые ячейки попадет несколько значений $\lambda_{i,j}$ – в этом случае выбирается максимальное. В некоторые ячейки не попадает ни одно значение – в них значения $\lambda_{i,j}$ определяются путем интерполяции криволинейными сплайнами с помощью встроенной процедуры “Surface” пакета Generic Mapping Tool [Wessel et al., 2019].

Параметр b оценивается, если число событий в круге составляет 50 или более. В противном случае используется региональная оценка параметра b . Оценивание проводится методом максимального правдоподобия для группированных данных с ограниченным максимумом магнитуды [Bender, 1983]. Этот метод дает несмещенную оценку для выборок небольшого объема. Полученные оценки также приписываются среднему положению эпицентров, в случае нескольких оценок выбирается сделанная по максимальному числу событий.

Оценка параметров афтершоков

Данных для проведения локальных оценок параметров афтершоков, кроме продуктивности, обычно недостаточно, поэтому для параметров c и p закона Омори–Утсу и параметра b_{aff} закона Гутенберга–Рихтера выполняются региональные оценки.

Для оценки параметров закона Омори–Утсу составляется общий каталог времен афтершоков относительно их “родителей” в схеме Заляпина–Бен-Зиона. Параметры определяются методом, представленным в работе [Holschneider et al., 2012]. Оценка параметра b_{aff} проводится методом, представленным в работе [Bender, 1983], для всех афтершоков.

Средняя дельта-продуктивность $\Lambda_{\Delta M}$ [Shebalin et al., 2020] также оценивается локально методом среднего положения. В кругах радиуса R_Λ подсчитывается среднее число “потомков” по схеме Заляпина–Бен-Зиона для каждого события с эпицентром в этом круге, а значения приписываются среднему положению эпицентров. Потомки не обязательно должны иметь эпицентры в круге. Магнитуда потомков ограничена снизу величиной, на ΔM меньшей магнитуды “родителя”. Если в ячейку (i,j) попадает несколько значений, выбирается максимальное. Пустым ячейкам приписывается региональное значение.

Генерация синтетического каталога фоновых событий

Формирование синтетического каталога производится с помощью генератора случайных чисел с заданным распределением. Для каждого фонового события сначала синтезируется

время в соответствии с распределением Пуассона с параметром, равным региональному числу событий в единицу времени с $M \geq M_0$. Затем для этого события синтезируется значение магнитуды в соответствии с региональным магнитудно-частотным распределением. Стандартно принимается модель Гутенберга–Рихтера в пределах $M_0 \leq M \leq M_{\max}$. Магнитуда определяется с точностью 0.1.

Для определения координат гипоцентра используется трехмерная таблица интенсивности событий заданной магнитуды $\lambda_{i,j,m}$, пересчитанная из двумерных таблиц $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$. Здесь третий индекс соответствует магнитуде. Поскольку в данной работе вводятся ограничения на возможное положение эпицентров землетрясений с $M \geq 5.5$, определяемые результатами FCAZ-распознавания, то значения в ячейках трехмерной таблицы, соответствующие значениям магнитуды $M \geq 5.5$, обнуляются. Для всех значений магнитуды интенсивность нормируется так, чтобы сумма по пространственным элементам (i,j) для каждого значения магнитуды равнялась единице. Генерируется случайная величина с равномерным распределением на интервале $(0,1)$. По этому значению находится ячейка (i,j) . Затем более точное положение определяется в предположении равномерного распределения эпицентров внутри ячейки.

Глубина очага синтезируется аналогично работе [Малютин и др., 2024] по распределению Вейбулла с параметрами, определенными для всего региона.

Генерация полного синтетического каталога с афтершоками

Генерация афтершоков в синтетическом каталоге осуществляется по модели ETAS-е [Shebalin et al., 2020] для каждого события из каталога фоновых землетрясений. Для этого последовательно генерируются непосредственные афтершоки: сначала самого события, на второй итерации – афтершоки непосредственных афтершоков и т.д. Времена между ними определяются в соответствии со свойством Пуассоновского потока событий. Генерируется случайная величина u , имеющая равномерное распределение в интервале $(0,1)$. Время между событием i и первым непосредственным афтершоком t_{i1} определяется как $t_{i1} = -\ln(u)c^p / f(M_i)$, где $f(M_i)$ –

интенсивность потока афтершоков в момент события i . В соответствии с законом продуктивности [Shebalin et al., 2020, 2022] величина $f(M_i)$ сама является случайной и имеет экспоненциальное распределение. Среднее значение величины $f(M_i)$ находится из соотношения

$$\Lambda_{\Delta M} 10^{b_a(M_m - M_c - \Delta M)} = \int_{t_i}^{t_i+T} \frac{f(M_i)}{(t - t_i + c)^p} dt = \int_0^T \frac{f(M_i)}{(t + c)^p} dt = f(M_i) [u(T + c) - u(c)], \quad (3)$$

$$\text{где } u(x) = \begin{cases} \ln(x), & p = 1 \\ \frac{x^{1-p}}{1-p}, & p \neq 1 \end{cases}.$$

Для определения времени следующего афтершока генерируется новое значение u . Время второго афтершока от момента инициирующего землетрясения определяется как $t_{i2} = t_{i1} - \ln(u)(c + t_{i1})^p / f(M_i)$.

Итерации продолжаются (для каждого нового “родителя” генерируется новое значение функции $f(M_i)$), пока время нового афтершока не превысит значение T . Мы используем значение $T = 365$ сут. Часто оказывается, что у события i нет ни одного афтершока, благодаря чему вся процедура конечна.

Пространственные координаты эпицентра афтершока генерируются следующим образом. По формуле из работы [Wells, Coppersmith, 1994] рассчитывается площадь области афтершоковой активности:

$$S(\text{км}^2) = 10^{-3.49+0.91M_i}. \quad (4)$$

Затем вычисляются величины:

$$L1(\text{км}) = 0.5 \times 10^{-2.44+0.59M_m}, \quad (5)$$

$$L2(\text{км}) = S/L1/\pi.$$

Обычно $L1 > L2$, но возможна и обратная ситуация, поэтому далее мы оперируем величинами $L_{\max} = \max(L1, L2)$ и $L_{\min} = \min(L1, L2)$. Координаты эпицентра афтершока случайно генерируются как двумерная нормально распределенная случайная величина со стандартными отклонениями, соответствующими значениям большей ($L_{\max}$) и меньшей ($L_{\min}$) полуосям эллипса, ориентированного вдоль ближайшего

разлома из базы данных активных разломов ГИН РАН [Zelenin et al., 2022], и средними, равными координатам основного толчка. Если же направления разломов равноправны, то область имеет форму круга и координаты афтершока генерируется по двумерному нормальному распределению со стандартными отклонениями, равными радиусу круга $R[\text{км}] = (S/\pi)^{0.5}$, и средними, равными координатам основного толчка.

Верификация моделей

Чтобы проверить, действительно ли синтетический каталог моделирует реальный каталог землетрясений, в работе [Shebalin et al., 2024] было предложено использование L -теста [Zechar et al., 2010] и его модификаций, основанных на функции правдоподобия. Функция правдоподобия определяет совместную вероятность реальных событий, произошедших в соответствующих ячейках. Правдоподобие определяется как произведение по всем элементам пространства–магнитуды вероятностей реализации в них фактически наблюдаемого числа событий. Обычно используется логарифмическая функция правдоподобия:

$$L = \sum_{i,j,m} \ln[f_{ijm}(\omega(i,j,m))], \quad (6)$$

где $\omega(i,j,m)$ – число реализаций землетрясений в интервале магнитуды m и в элементе пространства (i,j) за период времени T ; $f_{ijm}(k)$ – вероятность k реализаций землетрясений за период T в ячейке пространства–магнитуды. При использовании синтетического каталога вероятность может быть рассчитана как частота реализаций значений k при разбиении каталога на интервалы длительности T . Чтобы понять по значению L , соответствует ли синтетический каталог реальным данным, можно путем многократного применения формулы (6) к непере-секающимся частям синтетического каталога землетрясений длительностью T каждый построить распределение величины L . По распределению оценивается доля γ случаев, в которых значение правдоподобия по синтетическому каталогу меньше, чем по реальному. Очень маленькое значение γ указывает на то, что модель не согласуется с наблюдениями (на доверительном уровне $100(1-\gamma)\%$). Значение $\gamma \sim 50\%$ означает хорошее согласование модели с реальными данными, по которым она построена.

Поскольку наибольший ущерб возникает от сильнейших землетрясений, важной дополнительной проверкой является сравнение положения эпицентров сильных землетрясений прошлого с положением эпицентров в синтетическом каталоге.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Детальное изучение сейсмичности Восточного сектора АЗРФ началось сравнительно недавно. Из-за малой плотности населения, отсутствия в досоветский период письменности у многих населяющих его народов в регионе очень мало свидетельств проявления землетрясений в прошлом. Фактически “сейсмическая история” региона начинается лишь с XX-го столетия. Наиболее детальная информация о сильных землетрясениях в регионе собрана в работах [Новый каталог ..., 1977; New Catalog ..., 1982] (в англоязычной версии каталога данные дополнены до 1981 г.). В более поздний период в регионе произошло около десятка землетрясений магнитудой 6.0 и более. Два из них были неожиданностью с точки зрения карт ОСР, что привело к существенной коррекции карт именно в рассматриваемом регионе (см. рис. 1). Это Олюторское землетрясение с $M = 7.6$ [Chebrov, 2010; Lander et al., 2010; Rogozhin et al., 2010] и Илин-Тасское (Абыйское) землетрясение с $M = 6.7$ [Shibaev et al., 2020]. Совместному анализу тектоники, геодинамики и сейсмичности в регионе в последние годы посвящен целый ряд исследований [Имаев и др., 2020; Imaeva et al., 2019; Daragan-Sushchova et al., 2015; Kanao et al., 2015].

В качестве исходных данных в работе мы использовали наиболее полный и представительный каталог землетрясений с однородной магнитудной шкалой [Gvishiani et al., 2022a], созданный путем системно-аналитического алгоритмического объединения [Vorobieva et al., 2022] данных различных каталогов и исследования соотношений разных шкал магнитуды и энергетического класса. Каталог содержит информацию о 23 254 сейсмических событиях за период с 1962 по 2020 гг. Он находится в открытом доступе на сайте Мирового центра данных по физике твердой Земли (http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/arctic_seism.html).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Выделение в объединенном каталоге [Gvishiani et al., 2022a] фоновых землетрясений и иерархических цепочек афтершоков по схеме Заляпина–Бен-Зиона было проведено в работе [Воробьева и др., 2024]. Для этого был выбран период каталога, в котором данные можно считать однородными. В период до 1982 г. магнитуды большинства событий были пересчитаны из целочисленных энергетических классов и имеют шаг дискретизации 0.5, поэтому для анализа был выбран период с 1982 по 2020 г. Оценка представительной магнитуды для этого периода составляет $M_c = 4.0$. Для фрактальной размерности и параметра закона Гутенберга–Рихтера получены оценки $d_f = 1.81$ и $b = 0.924$. По методике, представленной в работе [Shebalin et al., 2020], определено пороговое значение функции близости $lg\eta_0 = -0.61$. В каталоге по схеме Заляпина–Бен-Зиона выделены пары “родитель”–“потомок”. В отдельный каталог записаны фоновые события, не имеющие “родителя”. Каталог включает 371 событие с $M \geq M_c = 4.0$.

Модель параметров сейсмического режима фоновых землетрясений также была построена в работе [Воробьева и др., 2024]. Проведена необходимая для этого оценка фрактальной размерности и параметра b закона Гутенберга–Рихтера, получены региональные значения $d_f^b = 1.88$ и $b = 0.9$. Для локальных оценок $\lambda_{i,j}$ по методу МСП использовались круги радиусом $R = 200$ км, для интерполяции в кругах без эпицентров принималось значение $\lambda_{i,j} = 10^{-5}$ год $^{-1}$. Оценки $b_{i,j}$ проводились в кругах радиусом $R_b = 300$ км при минимальном количестве событий 50. При меньшем числе событий принималось региональное значение $b = 0.9$.

Как было показано в работе [Воробьева и др., 2024], даже простой расчет числа землетрясений с $M \geq 6$ по таблицам $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$ достаточно хорошо отражает возможные места таких землетрясений: большинство эпицентров землетрясений с $M \geq 6$, в том числе за период с 1900 по 1981 г., не учитывавшийся при построении модели, располагаются в локальных зонах высоких значений $\lambda_{i,j}$ ($M \geq 6$). Однако площадь таких зон слишком велика, вследствие чего из-за необходимости соблюдения региональной повторяемости сильных землетрясений локальные оценки оказываются заниженными.

В данной работе увеличение контрастности зон возможного возникновения сильных землетрясений достигается путем использования результатов FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b]. Зоны, в которых в соответствии с этими результатами возможны эпицентры землетрясений с $M \geq 5.5$, показаны на рис. 2. При расчете трехмерной нормированной таблицы $\lambda_{i,j,m}$ значения вне зон FCAZ обнуляются, благодаря чему, с учетом перенормировки, оценки повторяемости сильных землетрясений внутри зон увеличиваются.

Параметры закона Омори–Утсу оценивались на интервале (0.001, 100) сут (рис. 3). Получена устойчивая оценка $c = 0.0128$, $p = 1.09407$ (см. рис. 3а); модель с такими параметрами хорошо воспроизводит реальное распределение времен непосредственных афтершоков (см. рис. 3б).

Локальные оценки продуктивности для $\Delta M = 1.0$ проводились методом МСП в кругах радиусом $R_\Delta = 300$ км (рис. 4). Если число событий в круге оказывалось 5 или менее, то продуктивности присваивалось среднее значение 0.6. Высокие значения продуктивности наблюдаются на севере Камчатки и в районе Чукотки.

Синтетический каталог фоновых событий

Для оценки сейсмической опасности и, в частности, для построения карт ОСР используются

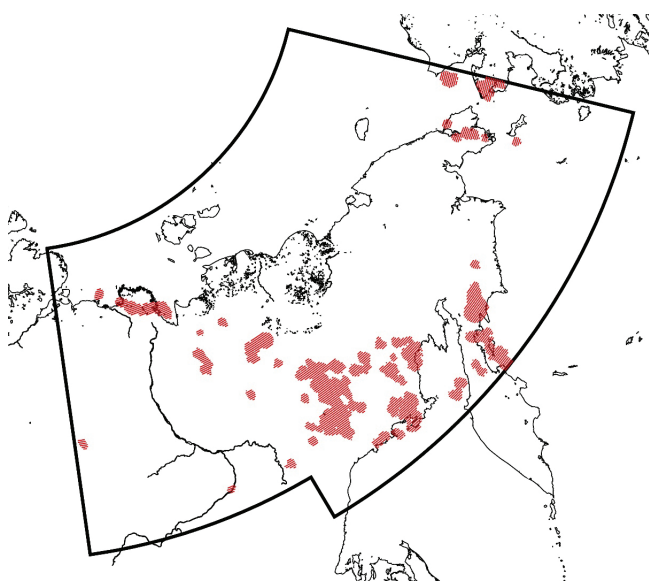


Рис. 2. Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 5.5$, определенные методом FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Зоны FCAZ показаны красной штриховкой. Сплошной контур показывает границы рассматриваемого региона.

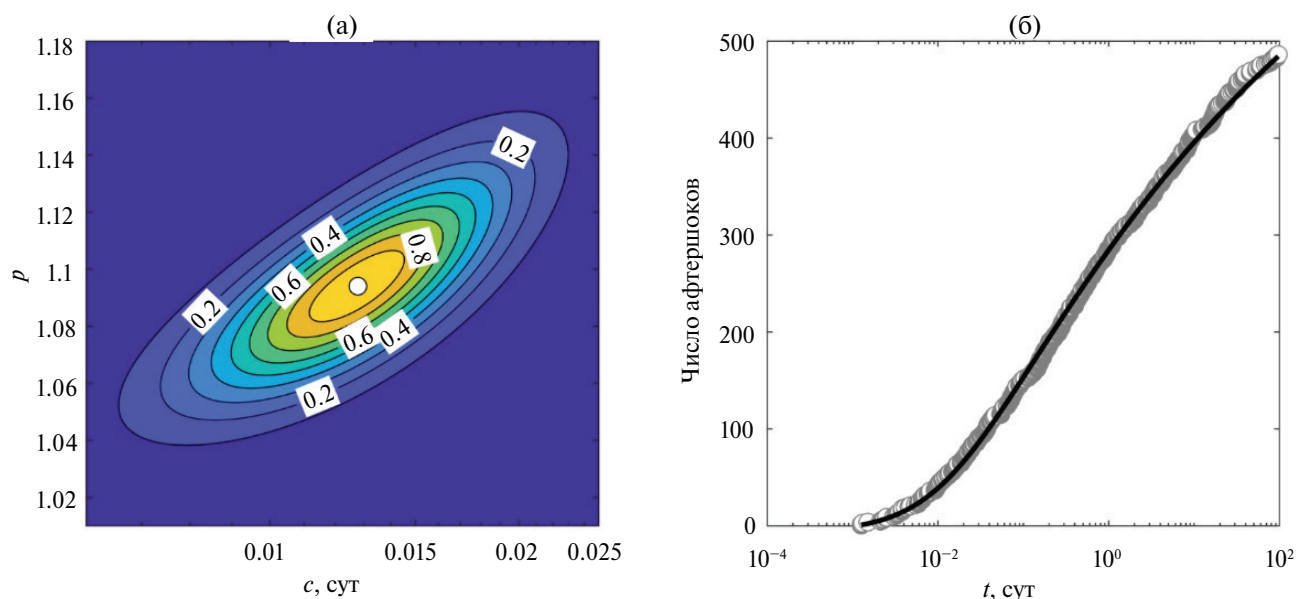


Рис. 3. Оценка параметров c и p закона Омори–Утсу для всех пар “родитель”–“потомок” в каталоге, размеченном по схеме Заляпина–Бен-Зиона.

а – апостериорное распределение байесовских оценок c и p : контурами с маркерами показаны линии уровня квантилей, белым кружком отмечено положение максимума правдоподобия; б – распределение времен афтершоков: кружками обозначено эмпирическое распределение по парам “родитель”–“потомок”, сплошной линией – теоретическое распределение по закону Омори–Утсу.

модели затухания. Интенсивность воздействия от землетрясения с определенными параметрами зависит не только от расстояния до эпицентра, но и от глубины очага. Поэтому важной характеристикой очага землетрясения является его глубина. В данной работе мы моделируем распределение глубины очага распределением Вейбулла

$f(h) = \frac{B}{A} \left(\frac{h}{A} \right)^{B-1} e^{-\left(\frac{h}{A} \right)^B}$ аналогично работе [Малютин и др., 2024]. Это распределение лучше других рассмотренных вариантов аппроксимирует эмпирическое распределение (рис. 5). Получены оценки параметров распределения Вейбулла $A = 14.7$, $B = 1.81$.

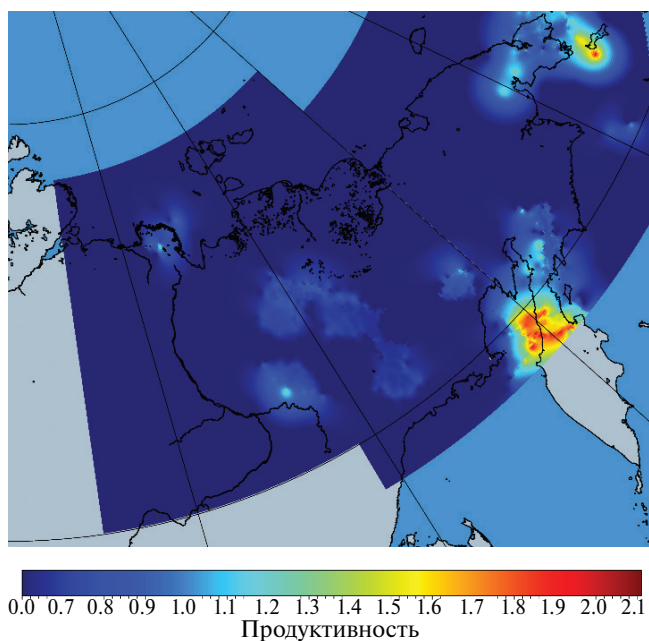


Рис. 4. Локальные оценки средней продуктивности землетрясений $\Lambda_{\Delta M}$ при $\Delta M = 1$ методом СМП.

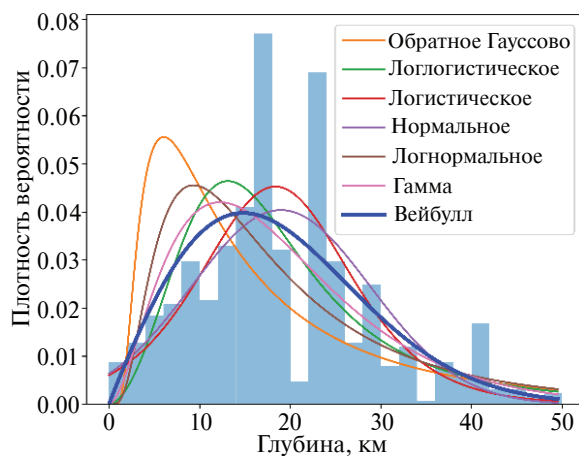


Рис. 5. Гистограммы функции плотности вероятности распределения глубин очага землетрясений с рассмотренными вариантами аппроксимаций. Наилучшая аппроксимация достигается распределением Вейбулла.

По методике, описанной в разделе “Генерация синтетического каталога фоновых событий”, сгенерирован каталог фоновых землетрясений, который содержит 189 552 землетрясения с магнитудой $M \geq 4$. Использована модель сейсмического режима в виде таблицы параметров $\lambda_{i,j,m}$, пересчитанной из двумерных таблиц $\lambda_{i,j}$ и $b_{i,j}$, рассчитанных ранее в работе [Воробьева и др., 2024]. Для землетрясений с $M \geq 5.5$ положение эпицентров ограничено областью, выделенной по результатам FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b].

Полный синтетический каталог был сгенерирован на основе синтетического каталога фоновых событий по методике, описанной в разделе “Генерация полного синтетического каталога с афтершоками”. Всего в каталоге представлены данные о 471 416 землетрясениях, произошедших за последние 20 тыс. лет, 281 864 из которых — афтершоки. Общая доля афтершоков, таким образом, составляет 60% от общего числа событий, что близко аналогичному значению в реальном каталоге, равному 65%. Небольшое различие может быть связано с недооценкой значений продуктивности из-за временного локального увеличения уровня представительной магнитуды в области сильных землетрясений [Shebalin, Baranov, 2017].

По методике, описанной в разделе “Верификация моделей”, была проведена верификация двух вариантов синтетического каталога: только фоновых событий и полного.

В первом случае была рассчитана логарифмическая функция правдоподобия $L = -3211.2$ для фоновых землетрясений из реального каталога с магнитудой $M \geq 4$. Значения функции $f_{ijm}(k)$ в формуле (6) рассчитывались из распределения Пуассона с параметром, равным значению в соответствующей ячейке трехмерной таблицы λ_{ijm} , нормированной на общее число событий. Чтобы оценить, насколько модель соответствует реальности, синтетический каталог фоновых событий разделен на отрезки длительностью 39 лет (это длительность фактического каталога) и по каждому отрезку, как по фактическому каталогу, определено значение L . Гистограмма полученных значений приведена на рис. 6а. Как видно из этого рисунка, значение L -теста лежит вблизи медианы распределения значений L по синтетическому каталогу. Это говорит об очень хорошем соответствии модели фактическим данным.

Для полного каталога теоретические значения функции $f_{ijm}(k)$ рассчитать очень сложно, поэтому были использованы значения частоты реализации значения k в ячейках пространства-времени-магнитуды в 512 вариантах отрезков синтетического каталога ($20000/39 = 512.82$). Для реального каталога значение L -теста составило -4776.1 .

В качестве дополнительного теста в данной работе было проведено сравнение положения эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ в реальном

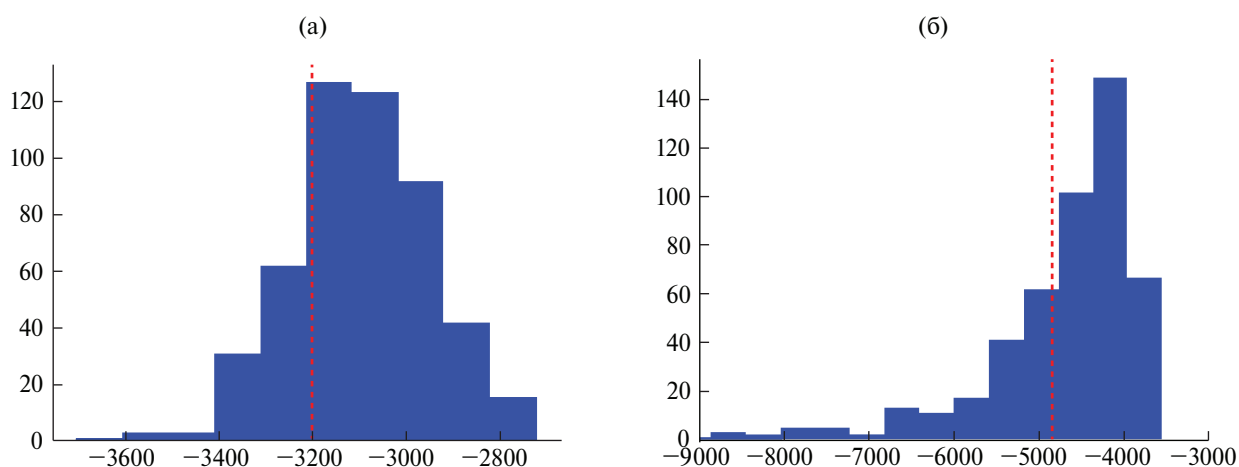


Рис. 6. Результаты верификации синтетического каталога землетрясений по фактическому каталогу согласно L -тесту. а — синтетический и реальный каталоги фоновых землетрясений, б — синтетический и реальный полные каталоги. Показаны гистограммы L -теста для отрезков синтетического каталога, вертикальной штриховой линией показано значение L -теста по реальному каталогу; гистограммы построены по реализациям L -теста одинаковой длительности (39 лет), равной длительности реального каталога, в которых реальный каталог заменяется выборкой из синтетического каталога.

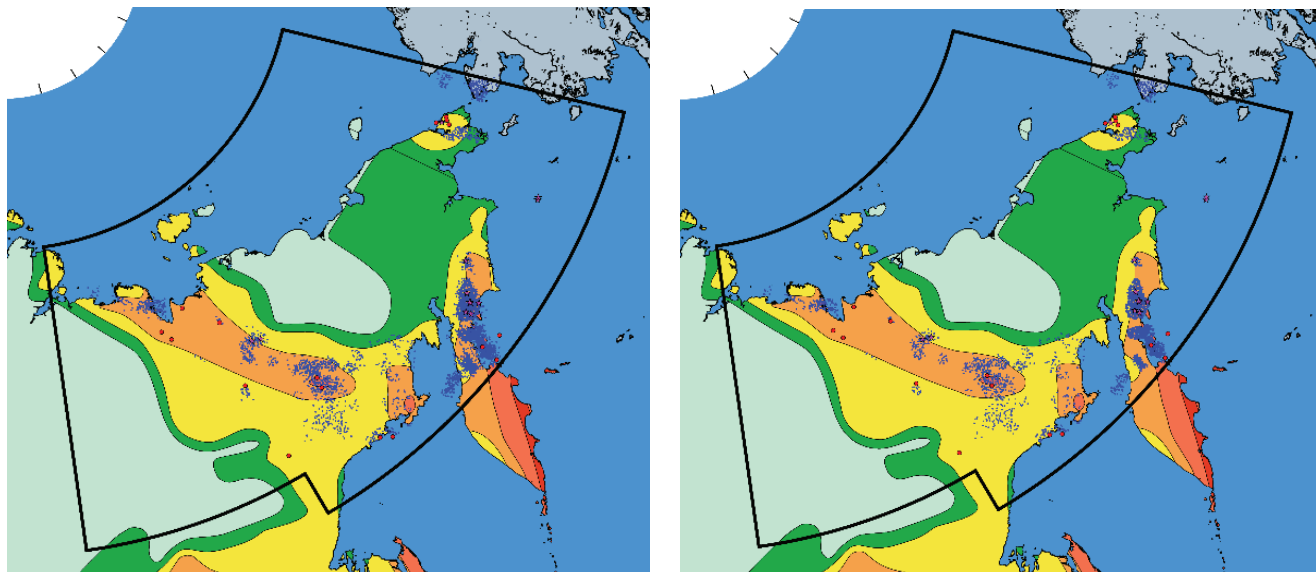


Рис. 7. Сравнение положений эпицентров с $M \geq 6.0$ в реальном и синтетическом каталогах. В качестве подложки использованы зоны нормативной балльности по карте ОСР-2015А (обозначения цветов см. на рис. 1). Синими точками обозначены эпицентры из синтетического каталога за 20 000 лет (на карте слева – все события, на карте справа – только фоновые), красными кружками – фактические эпицентры за 1900–1981 гг. [New Catalog ..., 1982], звездочками – фактические эпицентры за 1982–2020 гг. Рамкой показаны границы рассматриваемого региона.

и синтетическом каталогах (рис. 7). Как видно из этого рисунка, лишь небольшая доля эпицентров сильных землетрясений прошлого оказалась вне зон проявления сильных землетрясений в синтетическом каталоге. Эти землетрясения сосредоточены на севере Якутии и на севере Чукотки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

С использованием интегрированного каталога Восточного сектора АЗРФ [Gvishiani et al., 2022a] определены параметры сейсмического режима для региона в пределах 57.5° – 77° с.ш., 110° в.д.– 165° з.д. Проведена оценка параметров не только фоновых землетрясений, но и афтершоков. Это позволило сгенерировать синтетический каталог землетрясений, который воспроизводит те же значения параметров. Результаты L -теста свидетельствуют о хорошем соответствии синтетического каталога реальному, как в части только фоновых событий, так и в целом.

Синтетический каталог создавался и при подготовке карт ОСР-97, ОСР-2015, ОСР-2016. Главные отличия данного синтетического каталога состоят в следующем:

- 1) синтетический каталог сгенерирован по данным только каталога землетрясений и их строго алгоритмической обработки без использования

модели линеаментов и доменов, основанной на экспертных решениях;

- 2) места возможных сильных землетрясений также определены по данным исключительно каталога землетрясений по строгому алгоритму системного анализа без привлечения экспертных оценок;
- 3) синтетический каталог содержит в качестве одного из параметров время событий;
- 4) каталог моделирует афтершоковую активность.

В современных условиях уже имеющихся инструментальных данных о землетрясениях за несколько десятков лет, в рамках вероятностного подхода к оценке общей сейсмической опасности, по-видимому, нет необходимости в использовании дополнительных данных, в частности об активных разломах, главный недостаток которых состоит в недостаточной степени объективности. Данная работа является одной из первых попыток построения модели сейсмичности, основанной на расчетах по четкому и воспроизводимому алгоритму системного анализа.

Было бы закономерно сравнить действующие карты ОСР с аналогичными картами, построенными по сгенерированному синтетическому каталогу. Мы пока не ставили такую задачу, так как ее решение в значительной степени зависит

от выбора модели затухания, а точное воспроизведение модели, использованной в ОСР-2015, не представляется возможным. Тем не менее были сделаны предварительные оценки с использованием уравнений макросейсмического поля Н.В. Шебалина с коэффициентами, приведенными в работе [Новый каталог ..., 1977]. Чтобы избежать дискуссий на основе неполной информации, не касающихся сути данной работы, мы приводим здесь лишь расчеты площадей зон каждого нормативного балла, рассчитанного для вероятности превышений 10% за 50 лет (табл. 1). Для удобства сравнения в табл. 1 приводятся кумулятивные значения площадей (сумма площади зон данного и более высоких баллов). Расчеты направлены на то, чтобы выяснить, в какой степени разные элементы модели построения синтетического каталога влияют на расчеты ожидаемой балльности. Мы сравнили три варианта синтетического каталога (см. табл. 1): 1) каталог фоновых событий на основе оценки параметров сейсмического режима (этот каталог был получен в работе [Воробьева и др., 2024]); 2) каталог фоновых событий, в котором места сильных землетрясений ограничены результатами FCAZ-распознавания [Gvishiani et al., 2022b]; 3) полный каталог, описанный выше.

Как и следовало ожидать, максимальное отличие наблюдается при переходе от первого ко второму варианту. Сужение области, в которой возможны эпицентры самых сильных землетрясений, перераспределяет ожидаемую

Таблица 1. Оценки доли площади зон внутри рассматриваемой территории, в которых с вероятностью 10% за 50 лет ожидается превышение заданного балла макросейсмической интенсивности, от общей рассматриваемой площади

	ОСР2015-A ¹	Вариант 1 ²	Вариант 2 ²	Вариант 3 ²
VI	65.68	34.50	27.20	29.06
VII	41.57	5.52	7.52	9.09
VIII	13.28	1.48	1.70	2.46
IX	0.47	0.00	0.34	0.59

Примечание. 1 — доли площади нормативного балла на карте ОСР-2015-A от общей площади рассматриваемой территории; значения просуммированы от низшего балла к высшему; 2 — вероятности превышения рассчитаны по частоте расчетного воздействия (по уравнениям макросейсмического поля Н.В. Шебалина с коэффициентами из работы [Новый каталог ..., 1977]) от землетрясений соответствующего варианта синтетического каталога.

повторяемость таких событий, в результате чего в “разрешенных” местах ожидаемая повторяемость возрастает. Различие двух вариантов карт значимо именно в таких местах. Переход от второго варианта к третьему дает не столь значительные различия. Однако они тоже весьма существенны, в особенности для высоких баллов. Для понимания причин такого расхождения мы приводим карты эпицентров “синтетических” землетрясений с $M \geq 6.0$: всех (рис. 7, слева) и только фоновых (рис. 7, справа). Можно видеть, что афтершоки не только увеличивают суммарную повторяемость землетрясений с $M \geq 6.0$, но и несколько расширяют зону распространения их эпицентров.

Получен и другой важный результат: предварительные оценки значительно уменьшают площади территорий, отвечающих каждому нормативному баллу от VI до VIII на карте ОСР-2015, что является желательным результатом с учетом обнаруженным недавно их значительным завышением [Шебалин и др., 2022].

Синтетический каталог может и должен быть использован для построения карт ОСР. При этом сгенерированный в данной работе каталог включает фактор времени. Это позволит получать на его основе более точные оценки сейсмического риска, учитывающие пространственные корреляции сейсмических воздействий [Шебалин и др., 2024].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 21-77-30010 “Системный анализ динамики геофизических процессов в российской Арктике и их воздействие на развитие и функционирование инфраструктуры железнодорожного транспорта”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воробьева И.А., Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзедобоев Б.А., Дзеранов Б.В. Параметры сейсмического режима восточного сектора Арктической зоны Российской Федерации // Физика Земли. 2024. № 5. С. 3–21.

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзедобоев Б.А. Проблема распознавания мест возможного возникновения

- сильных землетрясений: актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29.
<https://doi.org/10.31857/S0002333720010044>
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
- Имаев В.С., Имаева Л.П., Козьмин Б.М. Сильное Улахан-Чистайское землетрясение 20 января 2013 года ($M_s = 5.7$) в зоне влияния системы разлома Улахан на Северо-Востоке России // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. Вып. 4. С. 740–759.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.408>
- Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1 : 8 000 000 / Главные редакторы: В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1999. 4 л.
- Крушельницкий К.В., Шебалин П.Н., Воробьева И.А., Селюцкая О.В., Антипова А.О. Границы применимости закона Гутенберга–Рихтера в задачах оценки сейсмической опасности и риска // Физика Земли. 2024. № 5. С. 69–84.
- Малютин П.А., Скоркина А.А., Воробьева И.А., Баранов С.В., Маточкина С.Д., Молокова А.П., Шебалин П.Н. Характерное распределение глубин коровых землетрясений Южной Сибири // Физика Земли. 2024. № 4. С. 50–63.
<https://doi.org/10.31857/S0002333724040046>
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. М.: Наука, 1977. 536 с.
- Пояснительная записка к комплексу карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Гл. ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–60.
- Ризниченко Ю.В. Сейсмический режим и сейсмическая активность // Сейсмическое районирование территории СССР / Под ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшкова. М.: Наука, 1980. С. 47–58.
- Шебалин Н.В. Количественная макросейсмика (фрагменты незавершенной монографии) // Магнитное поле Земли: математические методы описания. Проблемы макросейсмики. М.: ГЕОС, 2003. (Вычислительная сейсмология, Вып. 34). С. 57–200.
- Шебалин П.Н. Современные подходы к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 8. С. 738–748.
- Шебалин П.Н., Тихоцкий С.А., Коваленко А.А. О совершенствовании подходов к сокращению ущерба от землетрясений // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 10. С. 900–909.
- Шебалин П.Н., Гвишиани А.Д., Дзобоев 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.
<https://doi.org/10.31857/S2686739722601466>
- Akinci A., Moschetti M.P., Taroni M. Ensemble smoothed seismicity models for the new Italian probabilistic seismic hazard map // Seismological Research Letters. 2018. V. 89. № 4. P. 1277–1287.
<https://doi.org/10.1785/0220180040>
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E. 2004. V. 69. Iss. 6. P. 066106-1–066106-8.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066106>
- Baranov S.V., Gvishiani A.D., Narteau C., Shebalin P.N. Epidemic type aftershock sequence exponential productivity // Russian Journal of Earth Sciences. 2019. V. 19. Iss. 6. ES6003.
<https://doi.org/10.2205/2019ES000695>
- Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N. Modeling and Prediction of Aftershock Activity // Surveys in Geophysics. 2022. V. 43. P. 437–448.
<https://doi.org/10.1007/s10712-022-09698-0>
- Bender B. Maximum likelihood estimation of b -values for magnitude grouped data // Bulletin of the Seismological Society of America. 1983. V. 73. P. 831–851.
- Chebrov V.N. The Olyutorskii earthquake of April 20, 2006: Organizing surveys, observations, problems, and results // Journal of Volcanology and Seismology. 2010. V. 4. № 2. P. 75–78.
<https://doi.org/10.1134/S0742046310020016>
- Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968. V. 58. Iss. 5. P. 1583–1606.
- Daragan-Sushchova L.A., Petrov O.V., Sobolev N.N., Daragan-Sushchov Y.I., Grin'ko L.R., Petrovskaya N.A. Geology and tectonics of the northeast Russian Arctic region, based on seismic data // Geotectonics. 2015. V. 49. P. 469–484.
<https://doi.org/10.1134/S0016852115060023>
- Dzoboev B.A., Gvishiani A.D., Agayan S.M., Belov I.O., Karapetyan J.K., Dzeranov B.V., Barykina Y.V. System-Analytical Method of Earthquake-Prone Areas Recognition // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 17. 7972.
<https://doi.org/10.3390/app11177972>
- Gardner J.K., Knopoff L. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // Bulletin of the Seismological Society of America. 1974. V. 64. P. 1363–1367.

- Gerstenberger M.C., Marzocchi W., Allen T., Pagani M., Adams J., Danciu L. et al.* Probabilistic seismic hazard analysis at regional and national scales: State of the art and future challenges // *Reviews of Geophysics*. 2020. V. 58. e2019RG000653.
https://doi.org/10.1029/2019RG000653
- Giardini D., Grunthal G., Shedlock K.M., Zhang P.* The GSHAP Global Seismic Hazard Map // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. Iss. 6. P. 1225–1228.
https://doi.org/10.4401/ag-3784
- Gutenberg B., Richter C.F.* Frequency of earthquakes in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1944. V. 34. № 4. P. 185–188.
- Gvishiani A.D., Vorobieva I.A., Shebalin P.N., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Skorkina A.A.* Integrated earthquake catalog of the Eastern sector of the Russian Arctic // *Applied Sciences*. 2022a. V. 12. № 10. 5010.
https://doi.org/10.3390/app12105010
- Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Kedrov E.O., Skorkina A.A., Nikitina I.M.* Strong Earthquake-Prone Areas in the Eastern Sector of the Arctic Zone of the Russian Federation // *Applied Sciences*. 2022b. V. 12. № 23. 11990.
https://doi.org/10.3390/app122311990
- Helmstetter A., Werner M.J.* Adaptive spatiotemporal smoothing of seismicity for long-term earthquake forecasts in California // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2012. V. 102. № 6. P. 2518–2529.
https://doi.org/10.1785/0120120062
- Holschneider M., Narteau C., Shebalin P., Peng Z., Schorlemmer D.* Bayesian analysis of the modified Omori law // *Journal of Geophysical Research*. 2012. V. 117(B6). B06317.
- Imaeva L.P., Imaev V.S., Koz'min B.M.* Dynamics of the Zones of Strong Earthquake Epicenters in the Arctic–Asian Seismic Belt // *Geosciences*. 2019. V. 9. № 4. 168.
https://doi.org/10.3390/geosciences9040168
- Kanao M., Suvorov V., Toda S., Tsuboi S.* Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region // *Geoscience Frontiers*. 2015. V. 6. Iss. 5. P. 665–677.
https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.11.002
- Kossobokov V.G., Mazhkenov S.A.* On similarity in the spatial distribution of seismicity // *Computational seismology and geodynamics*. EOS: Transactions, American Geophysical Union. 1994. V. 1. P. 6–21.
- Lander A.V., Levina V.I., Ivanova E.I.* The earthquake history of the Koryak Upland and the aftershock process of the M_w 7.6 April 20(21), 2006 Olyutorskii earthquake // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. V. 4. № 2. P. 87–100.
https://doi.org/10.1134/S074204631002003X
- New Catalog of Strong Earthquakes in the USSR from Ancient Times through 1977. Report SE-31 / Editors-in-Chief N.V. Kondorskaya and N.V. Shebalin. Translated and Published by World Data Center A for Solid Earth Geophysics, EDIS, Boulder, Colorado, July 1982. 608 p.
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., Novikov S.S.* A geological study of the epicentral area of the April 20(21), 2006 Olyutorskii earthquake // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2010. V. 4. № 2. P. 79–86.
https://doi.org/10.1134/S0742046310020028
- Shebalin P., Baranov S.* Long-delayed aftershocks in New Zealand and the 2016 M7.8 Kaikoura earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. V. 174. № 10. P. 3751–3764.
https://doi.org/10.1007/s00024-017-1608-9
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. Iss. 2. P. 1264–1269.
https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252
- Shebalin P., Baranov S., Vorobieva I.* Earthquake Productivity Law in a Wide Magnitude Range // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. 881425.
https://doi.org/10.3389/feart.2022.881425
- Shebalin P.N., Baranov S.V., Vorobieva I.A., Grekov E.M., Krushelnitskii K.V., Skorkina A.A., Selyutskaya O.V.* Seismicity Modeling in Tasks of Seismic Hazard Assessment // *Doklady Earth Sciences*. 2024. V. 515. P. 514–525.
https://doi.org/10.1134/S1028334X23603115
- Shibaev S.V., Kozmin B.M., Imaev V.S., Imaeva L.P., Petrov A.F., Starkova N.N.* The February 14, 2013 Ilin-Tas (Abyi) earthquake ($M_w = 6.7$), Northeast Yakutia // *Russian Journal of Seismology*. 2020. V. 2. № 1. P. 92–102.
https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.09
- Spada M., Wiemer S., Kissling E.* Quantifying a potential bias in probabilistic seismic hazard assessment; seismotectonic zonation with fractal properties // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2011. V. 101. № 6. P. 2694–2711.
- Stock C., Smith E.G.C.* Adaptive kernel estimation and continuous probability representation of historical earthquake catalogs // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2002. V. 92. № 3. P. 904–912.
https://doi.org/10.1785/0120000233
- Ulomov V.I.* Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica*. 1999. V. 42. Iss. 6. P. 1023–1038.
https://doi.org/10.4401/ag-3785
- Vorobieva I.A., Grekov E.M., Krushelnitskii K.V., Malyutin P.A., Shebalin P.N.* High Resolution Seismicity Smoothing Method for Seismic Hazard Assessment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2024. V. 24. ES1003.
https://doi.org/10.2205/2024ES000892
- Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Barykina Yu.V., Antipova A.O.* Nearest Neighbor Method for Discriminating Aftershocks and Duplicates When

- Merging Earthquake Catalogs // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. 820277.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.820277>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture width, Rupture Area, and Surface Displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. V. 84. P. 974–1002.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H.F., Tian D. Generic mapping tools version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. V. 20. P. 5556–5564.
<https://doi.org/10.1029/2019gc008515>
- Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V. Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // *Natural Hazards*. 2012. V. 62. Iss. 3. P. 927–935.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Wong H., Keilis-Borok V. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Physical Review Letters*. 2008. V. 101. Iss. 1. 018501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.018501>
- Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in southern California I: identification and stability // *Journal of Geophysical Research*. 2013. V. 118. Iss. 6. P. 2847–2864.
<https://doi.org/10.1002/jgrb.50179>
- Zechar J.D., Gerstenberger M.C., Rhoades D.A. Likelihood-based tests for evaluating space–rate–magnitude earthquake forecasts // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2010. V. 100. № 3. P. 1184–1195.
<https://doi.org/10.1785/0120090192>
- Zelenin E., Bachmanov D., Garipova S., Trifonov V., Kozhurin A. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. P. 4489–4503.
<https://doi.org/10.5194/essd-14-4489-2022>
- Zhuang J., Ogata Y., Vere-Jones D. Stochastic declustering of space-time earthquake occurrences // *Journal of the American Statistical Association*. 2002. V. 97. P. 369–380.
<https://doi.org/10.1198/016214502760046925>

SYNTHETIC EARTHQUAKE CATALOG FOR THE EASTERN SECTOR OF THE ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

P. N. Shebalin^{1,2,*}, A. D. Gvishiani^{1,3}, P. A. Malyutin², E. M. Grekov²,
 A. O. Antipova^{1,2}, I. A. Vorobiova^{1,2}, B. A. Dzeboev^{1,3}, B. V. Dzeranov¹

¹*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences,
 Molodezhnaya str., 3, Moscow, 119296 Russia*

²*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences,
 Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia*

³*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
 Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*e-mail: p.n.shebalin@gmail.com

The synthetic earthquake catalog for the Eastern sector of the Arctic zone of the Russian Federation is constructed in the paper. It reproduces and models the key properties of the catalog of actual earthquakes in the region. At the regional level, the Gutenberg–Richter magnitude frequency law for earthquakes of different magnitudes is satisfied both for the catalog as a whole and for the catalog of main shocks, in which aftershocks are removed. Local values of the parameters of this law are reproduced. The synthetic catalog includes aftershocks, while local ratios of the number of aftershocks and the total number of earthquakes, estimated from the catalog of actual events, are observed. The results of strong earthquake-prone areas recognition using the FCAZ method are used as a model of the spatial distribution of the strongest earthquakes in the region ($M \geq 5.5$). Preliminary calculations of the normative intensity were carried out to compare three variants of the synthetic catalog (full model, without aftershocks, without FCAZ recognition results and aftershocks).

Keywords: seismic mode, model, synthetic earthquake catalog, model verification, L-test, Eastern sector of the Arctic Zone of the Russian Federation, earthquake-prone areas recognition, FCAZ, aftershocks, earthquake productivity