

НЕОДНОРОДНОСТЬ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ

И.И. Нугманов^{1,2}, А.Н. Беседина^{2,3}, А.А. Остапчук^{2,3}

¹ – АНО ВО «Университет Иннополис», г. Иннополис, Россия; *i.nugmanov@innopolis.ru*

² – Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

³ – Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

Курило-Камчатская дуга является объектом сейсмологических наблюдений на протяжении не менее 120 лет [Rhea и др., 2007; Федотов и др., 2011; Ломтев и др., 2013]. Дуга простирается примерно на 2100 км от о. Хоккайдо, Япония, вдоль Курильских островов и тихоокеанского побережья Камчатского полуострова до пересечения с Алеутской дугой в районе Командорских островов, Россия, и является согласно [Федотов и др., 2011] «в первом приближении однородной протяженной структурой». Согласно утверждению [Злобин и др., 2011] Курило-Камчатская дуга, представляя регион субдукции Тихоокеанской литосферной плиты является сейсмофокальной зоной планетарного масштаба. Исследования распределения современных землетрясений с определенными механизмами очагов в зоне субдукции выполненные [Злобин и др., 2011] на основе анализа всех известных каталогов (Геофизическая служба РАН и филиалы, NEIC, Гарвард и др.) показало, что наибольшее их число расположено на глубинах до 80 км. При этом в положении эпицентров землетрясений наблюдается выраженная зональность при движении с востока на запад в крест простирания Курило-Камчатской дуги. Сейсмофокальная зона представляет ослабленную многочисленными тектоническими нарушениями систему протяженных глубинных разломов, погружающуюся от глубоководной впадины к матерiku до глубин порядка 500-700 км под углом в среднем равным 50° [Симбирева и др., 1976; Rhea и др., 2007; Полец, 2017]. Полец А.Ю. [Полец, 2017] отмечает также, что наибольшее количество сильных глубокофокусных землетрясений Северного полушария за период инструментальных наблюдений зарегистрировано именно в пределах Курило-Камчатско-Охотского региона. Временные оценки повторяемости землетрясений в пределах региона по данным [Гусева, Архипова, 2019] имеют следующие гармоника: для $M = 4.0 - 3$ суток, для $M = 5.0 - 1$ месяц; для $M = 6.0 - 6$ месяцев; $M = 7.0 - 2$ года, для $M \geq 8$ – в среднем каждые 10 лет. Для последних, Лобковский [Лобковский, 2021] отмечает особую значимость необходимости прогноза землетрясений, в виду высвобождения значительных упругих напряжений, имеющих огромную разрушительную силу. Разработанный С.А. Федотовым [Федотов, Славина, 1968] метод долгосрочного сейсмического прогноза позволяет оперировать понятием цикличности сейсмического процесса и выделить 17-летний эффективный период повторяемости сильнейших землетрясений [Федотов, Соломатин, 2019] и его гармоника для Курило-Камчатской дуги. Следует отметить, что концепция сейсмического цикла позволяет для 5 летнего периода применения метода долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова выделить 3 принципиальные стадии, различающиеся по величине накопленной упругой энергии: I – стадию афтершоковых процессов, II – стадию стабильного накопления упругой энергии; III – завершающая стадия, характеризующаяся значительным количеством накопленной энергии, активизацией, затишьями, высокой нестабильностью сейсмического процесса, форшоками [Федотов и др., 2011]. Такая градация позволяет выделять особые участки наибольшей вероятности возникновения сильнейших землетрясений ($M \geq 7.7$) – сейсмические бреши [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019]. На протяжении Курило-Камчатской дуги Федотов С.А. [Федотов, Соломатин, 2019] выделяет в среднем до 20 участков с длиной от 100 до 200 км и шириной 50 или 100 км. При этом авторы 5-летних сейсмических прогнозов [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019] неоднократно указывают, что ввиду накопленной нереализованной упругой энергии в пределах Курило-Камчатской дуги существует потенциальная возможность возникновения мегаземлетрясения с $M \geq 8.5$, способного охватить (объединить) несколько сейсмических брешей.

Понятие сейсмической бреши как участка накопления сейсмической энергии, можно ассоциировать с зонами «неровностей» (asperities), буквально «прочные, напряженные» пятна, в окружении которых происходит частичный сброс напряжений в межсейсмический период [Кочарян, Кишкина, 2020]. Согласно [Lau и др., 1982] модель «неровностей», служит основой для понимания процессов, происходящих в зонах субдукции по всему миру, и помогает объяснить природу крупных землетрясений в этих регионах. В частности, это относится к форме, размерам, пространственному распределению «неровностей» в зоне субдукции, а также к феноменологическому наблюдению о

приуроченности очагов повторных землетрясений к одному и тому же участку разлома – «неровности» [Кочарян, Кишкина 2020]. Это наблюдение, не противоречит, а лишь подкрепляет методологические основы долгосрочного сейсмического прогноза С.А. Федотова по установлению наиболее вероятных мест следующих сильнейших ($M \geq 7.7$) землетрясений в местах, накопления сейсмической энергии [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019].

Повышенная плотность разломов, как правило, коррелирует с более высокими магнитудами землетрясений, что говорит о том, что регионы со сложными системами разломов более подвержены значительным сейсмическим событиям [Шерман и др., 2022]. Федотов и Соломатин [Федотов, Соломатин, 2019] оценивают среднюю вероятность сильных землетрясений (магнитудой $M \geq 7.7$), происходящих в любом заданном месте Курило-Камчатской дуги в течение пяти лет (2019-2024 гг.), в пределах от 3.6% до 4.2%. Исследования выявили закономерности в пространственном и временном распределении сейсмических событий, указывающие на то, что крупные землетрясения часто группируются в определенные периоды и места в пределах дуги, под влиянием тектонических взаимодействий и геологических условий [Викулин, 2003].

Исследование сейсмичности Курило-Камчатской дуги последних лет представлено в работах [Чебров и др., 2015; Чебров и др., 2022]. Необходимо отметить, что при изучении скоростных характеристик разреза полуострова Камчатка выполненные коллективом авторов [Резниченко и др., 2023] установлено наличие локальных особенностей глубинного строения – существования слоев, физические свойства которых влияют на распространение упругих волн. Локальные особенности поля кинематического параметра V_p/V_s [Кучай и др., 2020] отражают неоднородности поля тектонических напряжений (зоны сжатия и растяжения). Лобковский [2022] также указывает на наблюдающиеся аномалии поля современных движений земной поверхности по данным регистрации сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в Курило-Камчатской зоне субдукции: сегменты дуги находящиеся на разных стадиях сейсмического цикла накапливают упругие напряжения локально, в пределах сейсмогенных блоков континентальной окраины, которые разгружаются в моменты возникновения крупнейших субдукционных землетрясений. Lay [2009] указывает, что локальные особенности упругих характеристик земной коры, а также наличие зон сжатия и растяжения, оказывают значительное влияние на наблюдаемую при землетрясениях функцию источника (source time function, STF). Таким образом, для понимания механизмов формирования сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги, их зоны разрыва, интерес представляет изучение локальных особенностей поля напряжений, в частности распределения «неровностей» («asperities»).

Цель настоящего исследования – выявление пространственно-временных особенностей распределения сейсмичности в областях локализации сильнейших землетрясений Курило-Камчатской зоны субдукции.

Объект исследования и методика. Территориально объект исследования, Курило-Камчатская дуга, охватывает зону административной ответственности Камчатского (КФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Петропавловск-Камчатский, и Сахалинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба Российской академии наук" (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Южно-Сахалинск. Вся территория исследования охвачена каталогом USGS NIEC (Геологическая служба США).

Для исследования были использованы каталоги КФ ФИЦ ЕГС РАН и USGS NIEC (Геологическая служба США) за период инструментальных сейсмологических наблюдений с 01.01.1990 по 20.08.2024 гг.

В таблице 1 представлена сводная информация о содержании каталогов сейсмических событий. Пространственное положение сейсмических событий представлено на рис. 1.

Таблица 1. Сведения о каталогах землетрясений для территории Курило-Камчатской дуги

Источник	Длительность охвата наблюдений	Количество событий	Представительная магнитуда M_c
USGS NIEC (Геологическая служба США)	с 01/06/1990 по 12/08/2024 гг.	16322	3.92
КФ ФИЦ ЕГС РАН	с 01/01/1990 по 20/08/2024 гг.	39008	2.96

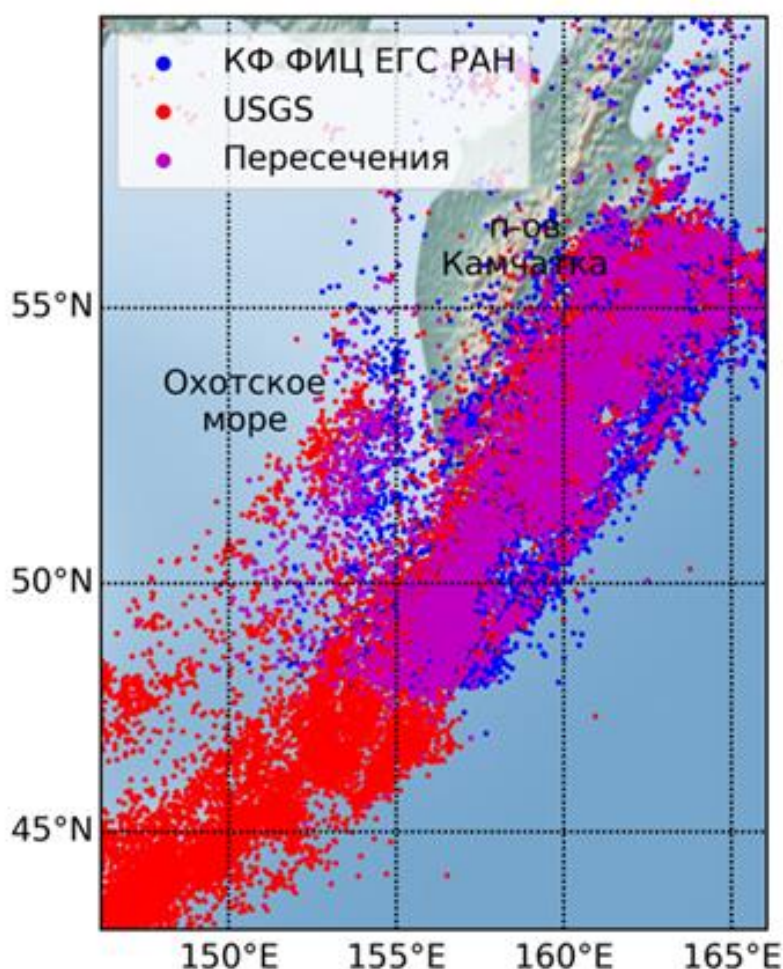


Рис. 1. Участок исследования. Символами показаны эпицентры землетрясений каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН (синим цветом) и USGS NIEC (Геологическая служба США, красным цветом), а также землетрясений, присутствующих в обоих каталогах (фиолетовым цветом)

Привлечение для анализа результатов регистрации сейсмических событий из разных каталогов особенно оправдано, не только ввиду увеличения выборки, но и с точки зрения дополнения афтершоковых последовательностей сильнейших землетрясений, которые характерны для Курило-Камчатской дуги. Ввиду технических ограничений разных конфигураций сетей регистрации многие события после сильного землетрясения могут быть пропущены из-за высокого уровня шума [Vorobieva, 2022]. При этом не исключением является проблема выявления дубликатов, то есть записей различных каталогов, относящихся к одному и тому же сейсмическому событию.

Объединение каталогов землетрясений представляется перспективным методом улучшения полноты и представительности сейсмического каталога. Подобный опыт представлен в ряде научных публикаций для различных регионов [Zare M. et al., 2014; Sawires R. et al., 2019; Vorobieva, 2022; Vorobieva, 2023; Gvishiani, 2023].

В работах [Vorobieva, 2022; Vorobieva, 2023; Gvishiani, 2023] указывается, что основная сложность в идентификации дубликатов состоит именно в том, что такие записи могут быть схожи в метриках пространства и времени к афтершокам. Для разрешения подобной ситуации предлагается использовать подход аналогичной задаче различения афтершоков и независимых событий с применением модифицированной метрики ближайшего соседства.

Данный метод основан на том, что, согласно [Шебалин, 2018], считается, что сейсмичность состоит из двух частей: (1) землетрясения, которые являются независимыми и (2) землетрясения, возникающие под воздействием других землетрясений (связанные события). Если определить в пространстве-времени-магнитуде меру связи между землетрясениями, то сейсмичность может быть представлена деревом связей между «ближайшими соседями». Определив, дополнительно, пороговое значение для этой меры, как границу между связанными и независимыми землетрясениями, то дерево распадается на отдельные деревья связанных событий.

Основные положения применения математических методов по определению порогового значения приводятся в работах [Шебалин, 2018; Pisarenko, 2019]. Шебалин [Шебалин, 2018] отмечает, что достаточно простым и надежным является корреляционный вариант пространственно-временной метрики, предложенный [Baiesi, Paczuski, 2004] и дополненный методом определения порогового значения в работах [Zaliapin, 2008, 2013, 2016, 2020]. Корреляционная метрика (функции «ближайшего соседства») для каждой пары события $\{i, j\}$, примененной в данной работе имеет вид (1):

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

где $t_{ij} = (t_j - t_i)$ — время между двумя событиями; $r_{ij} = (r_j - r_i)$ — расстояние между двумя событиями; M — величина события (магнитуда); d — фрактальная размерность пространственного распределения землетрясений; b — наклон распределения Гутенберга – Рихтера.

Далее для каждого события j определялся его уникальный «ближайший сосед» i на основе минимизации метрики η_{ij} , рассчитанной по уравнению (2):

$$\eta_j = \min(\eta_{ij}, i < j). \quad (2)$$

В работе [Vorobieva, 2022] предложена 2-х этапная модификация метрики «ближайшего соседства» для разделения афтершоков (связанных событий) и дубликатов в объединенном каталоге, которые происходят близко в пространстве и времени:

Дубликаты не имеют причинной связи, поскольку записи одного и того же землетрясения разными сетями являются независимыми событиями, поэтому разница во времени может быть как положительной, так и отрицательной.

Дубликаты не образуют дерево, а формируют пары, в которых события обязательно принадлежат разным исходным каталогам.

В данной работе в качестве основного каталога был выбран каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН, все события которого были помечены категорией «1». Соответственно события каталога USGS NIEC получили категорию «2». Такой выбор не имеет влияния на результат идентификации дубликатов, поскольку задача поиска ближайшего соседа является симметричной [Vorobieva, 2022]. Алгоритм, использованный авторами работы, устанавливает соответствие между событиями из двух каталогов, после чего выполняется классификация землетрясений на уникальные и дубликаты с использованием евклидовой метрики (рис. 2).

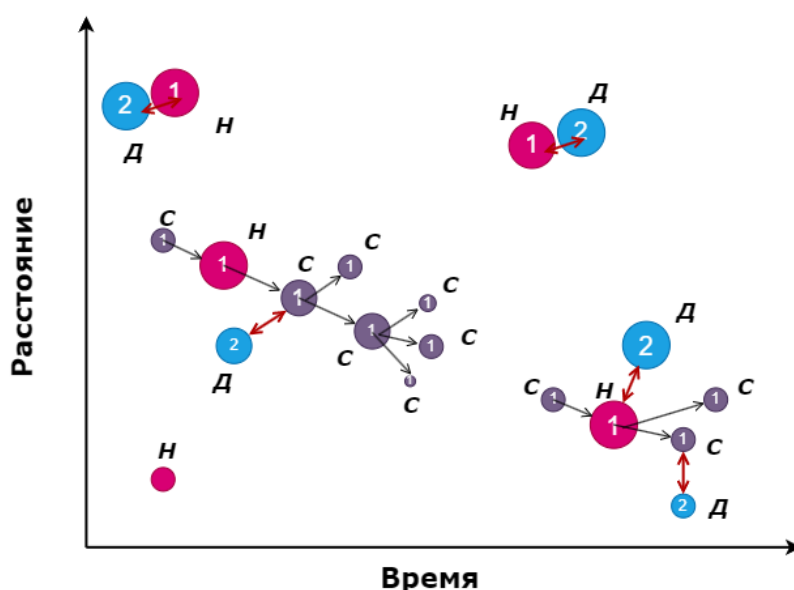


Рис. 2. Схема, поясняющая работу алгоритма идентификации дубликатов и декластеризации на основе метрики «ближайшего соседства» в пространстве и времени. Цифры в кружках определяют принадлежность события к каталогу. Буквами обозначены: Н – независимые события, С – связанные события, Д – дубликаты

Следует отметить, что для каждого исходного каталога, объединённого каталога, и всех последующих процедур преобразования (идентификация и удаление дубликатов, декластеризация) объединенного каталога сопровождалось оценкой полноты и определением представительной магнитуды M_c . В данном исследовании для оценки полноты каталога землетрясений была использована программная реализация метода, предложенного [Wiemer, 2000].

Для расчета фрактальной размерности d (в уравнении (1)), которая определяет вес пространственной компоненты относительно веса временной компоненты, был использован метод расчета фрактальной размерности Минковского-Буле (box-counting) на основе местоположений эпицентров землетрясений [Falconer, 1990].

Следующим этапом после исключения из анализа сейсмичности дубликатов был этап декластеризации объединенного каталога. В отличие от предложенного в работе [Pisarenko, 2020] процедуры случайной перестановки времён возникновения событий, которая разрушает причинно-следственные связи, существующие в отдельных кластерах, был использован иной подход. Исследования [Zaliapin, 2008, 2013] показали, что пуассоновское поле с отмеченной стационарной временной компонентой, равномерной или неоднородной случайной пространственной компонентой и распределением магнитуд по закону Гутенберга-Рихтера соответствует одномодальному распределению функции «ближайшего соседа» η_j . Подобное распределение отнесено нами к фоновой сейсмичности, представленной незначимыми событиями по [Шабалин, 2018]. Используя в качестве порогового значения η_0 1% перцентиль предложенное в работе [Ostapchuk, 2022] равное -4.58 было проведена декластеризация объединенного каталога на независимые и связанные события (рис. 3).

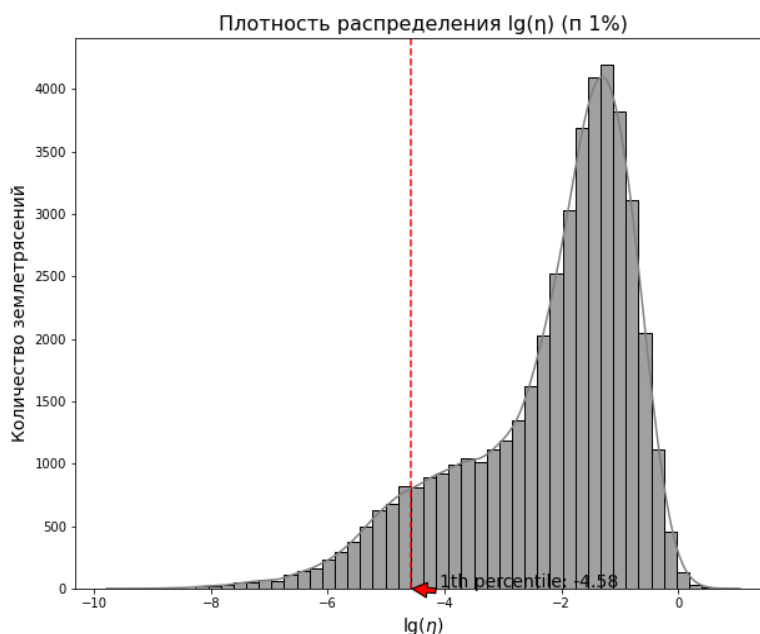


Рис. 3. Распределение функции «ближайшего соседа» для событий объединенного каталога

Результаты. Для более детального исследования двух множеств событий были построены карты нормированной плотности количества землетрясений (рис. 4). Карты плотности рассчитывались с использованием геоинформационных технологий. Пространство области исследования было разделено на равные ячейки размером 10 км. На данном этапе исследований было принято решение об использовании равномерного разбиения области на сетку, что является эффективным способом подсчета плотности исходных точечных данных, без привлечения дополнительной информации о «естественных» границах агрегации данных [Bennett, Vale, 2023]. Вокруг центра каждой ячейки выделялась окружность с радиусом 100 км и рассчитывалось количество событий, попадающих в эту окружность, которое далее делилось на ее площадь (км^2). Расчет карты плотности проводился по данным координат эпицентров для получения информации о пространственных закономерностях. На данном этапе исследования было принято решение не использовать магнитуды событий для создания матрицы весовых коэффициентов. Значения на картах плотности нормировались на максимальную величину каждого из множеств (независимых и связанных событий) для получения сопоставимого представления в интервале $[0;1]$. На картах наблюдаются несколько обособленных зон с повышенной плотностью количества событий, которые имеют различное пространственное расположение для

фоновой и кластерной сейсмичности. Для совместного анализа фоновой и связанной сейсмичности проводилось объединение двух карт плотностей. Для этого выполнялось поэлементное скалярное перемножение нормированных матриц плотностей событий. Для повышения контрастности результирующей карты дополнительно извлекался квадратный корень из найденной объединенной матрицы плотности. Построенная объединенная карта плотности количества фоновых и кластеризованных (связанных) событий использовалась для выделения предполагаемых областей «асперти» на поверхности скольжения, которые представляют собой участки повышенной плотности сейсмических событий. Обобщая полученные результаты, на объединенной карте плотности событий можно выделить крупные области, которые могут включать несколько контактных пятен в соответствии с идеей о потенциальной возможности возникновения сильного землетрясения, способного охватить несколько «асперити» (рис. 4). Оценка магнитуды потенциального события для выделенных зон проводилась по корреляционным соотношениям между линейным масштабом события L и величиной скалярного сейсмического момента M_0 для крупных землетрясений с разломами $L > 50$ км [Kocharyan, 2014]:

$$M_0 = 4.57 \cdot 10^{15} \cdot L^{2.26} \quad (3)$$

Выполненные оценки показали, что вдоль Курило-Камчатской дуги выделены зоны локализации потенциально возможных очагов мегаземлетрясений с магнитудами 8, 8.5 и 9. Оценка максимальной магнитуды проводилась с учетом следующих линейных размеров выделенных структур, 332.5, 708.5 и 1468 км. Области разрыва таких событий могут представлять собой объединение от 2 до 5 зон «асперити».

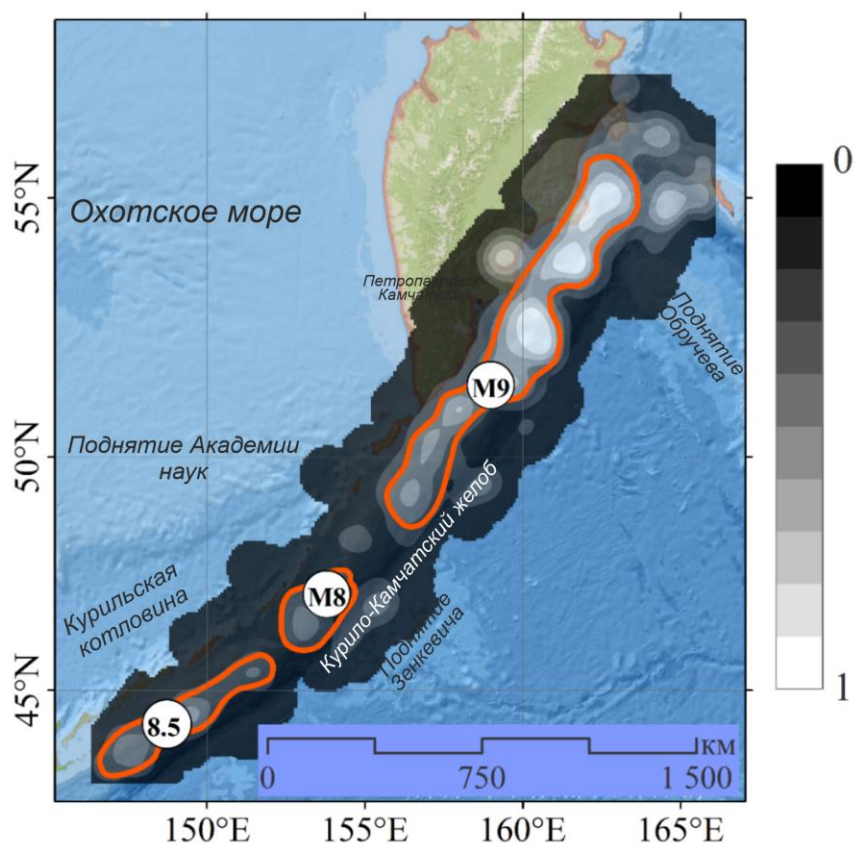


Рис. 4. Объединенная карта плотности независимых и связанных событий. Оранжевые линии очерчивают контуры, соответствующие областям разрыва потенциальных сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги с магнитудами 8, 8.5 и 9

Литература

1. Злобин Т.К., Сафонов Д.А., Полец А.Ю. Распределение землетрясений по типам очаговых подвижек в Курило-Охотском регионе // Доклады Академии наук. 2011. Т.440. №4. С. 527–529.
2. Кочарян Г.Г., Кишкина С.Б. Физическая мезомеханика очага землетрясения // Физическая мезомеханика. 2020. Т.23. №6. С. 9–24.

3. Лобковский Л.И., Габсатаров Ю.В., Алексеев Д.А., Владимиров И.С., Рамазанов М.М., Ломтев В. Л., Нагорных Т. В., Сафонов Д. А. Особенности строения и сейсмотектоники Курильской системы дуга-желоб // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2013. №3 (33). С. 94–109.
4. Ломтев В.Л. К строению и истории Курило-Камчатского глубоководного желоба (СЗ Пацифика) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. №3. С. 36–47.
5. Полец А.Ю. Глубокофокусные землетрясения и тектоническое поле современных напряжений в Курило-Охотском регионе // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2017. №1 (191). С. 26–37.
6. Симбирева И.Г., Федотов С.А., Фиофилактов В.Д. Неоднородности поля напряжений Курило-Камчатской дуги по сейсмологическим данным // Геология и геофизика. 1976. №1. С. 70–85.
7. Федотов С.А., Славина Л.Б. Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой // Известия АН СССР. Физика Земли. 1968. №2. С. 8–1.
8. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-в 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017-V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. №6. С. 6–22.
9. Федотов С.А., Соломатин А.В., Чернышев С.Д. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на IX 2010-VIII 2015 гг., достоверность предыдущих прогнозов и их применение // Вулканология и сейсмология. 2011. №2. С. 3–27.
10. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Яцук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 18.
11. Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т.21. №3. С. 66–91.
12. Шебалин П.Н. Математические методы анализа и прогноза афтершоков землетрясений: необходимость смены парадигмы // Чебышевский сборник. 2018. Т.19 (4). С. 227–242.
13. Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. 2004. V.69. №6. P. 066106.
14. Bennet L., Vale F. Spatial Statistics Illustrated. Redlands, California: Esri Press. 2023. 185 p. Bürgmann R., Kogan M. G., Steblov G.M., Hilley G., Levin V.E., Apel E. Interseismic coupling and asperity distribution along the Kamchatka subduction zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2005. V.110. №B7.
15. Falconer D.S. Selection in different environments: effects on environmental sensitivity (reaction norm) and on mean performance // Genetics Research. 1990. V.56. №1. P. 57–70.
16. Lay T., Kanamori H., Ammon C., Hutko A., Furlong K., Rivera L. The 2006–2007 Kuril Islands great earthquake sequence // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2009. V.114. №B11.
17. Ostapchuk A., Polyatykin V., Popov M., Kocharyan G. Seismogenic patches in a tectonic fault interface // Frontiers in Earth Science. 2022. V.10. P. 904814.
18. Rhea S., Tarr A.C., Hayes G., Villaseñor A., Furlong K.P., Benz H.M. Seismicity of the earth 1900–2007, Kuril-Kamchatka arc and vicinity: U.S. Geological Survey Open-File Report. 2010. P. 2010–1083.
19. Sawires R., Santoyo M. A., Peláez J. A., Corona Fernández R. D. An updated and unified earthquake catalog from 1787 to 2018 for seismic hazard assessment studies in Mexico // Scientific data. 2019. V.6. №1. P. 241.
20. Vorobieva I.A., Gvishiani A.D., Dzeboev B.A., Dzeranov B.V., Barykina Y.V., Antipova A.O. Nearest neighbor method for discriminating aftershocks and duplicates when merging earthquake catalogs // Frontiers in Earth Science. 2022. V.10. P. 820277.
21. Wiemer S. Earthquake statistics and earthquake prediction research. Institute of Geophysics; Zürich, Switzerland. 2000.
22. Zaliapin I., Ben-Zion Y. Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. V.118 (6).
23. Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // Physical review letters. 2008. V.101. №1. P. 018501.
24. Zare M., Amini H., Yazdi P., Sesetyan K., Demircioglu M. B., Kalafat D., Tsereteli N. Recent developments of the Middle East catalog // Journal of seismology. 2014. V.18. №4. P. 749–772.