ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2025, № 2, с. 19–35

УДК 550.34

ОСОБЕННОСТИ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ДУГИ

© 2025 г. А. Н. Беседина[1, 2, *], Е. В. Новикова[1], П. В. Белоклоков[2], В. П. Комзелева[3, 4], Е. А. Кулик[2, 5], Е. А. Маршакова[6, 7], И. И. Нугманов[8], К. Ю. Потапова[3, 4]

[1]Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, г. Москва, Россия
[2]Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия
[3]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия
[4]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия
[5]Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
[6]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[7]Камчатский филиал Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН", г. Петропавловск-Камчатский, Россия
[8]Университет Иннополис, г. Иннополис, Россия
**E-mail: besedina.an@idg.ras.ru*

Поступила в редакцию 20.10.2024 г.
После доработки 28.11.2024 г.
Принята к публикации 25.12.2024 г.

Процессы, происходящие при взаимодействии блоков земной коры в зоне субдукции, находят отражение как в особенностях сейсмического режима, так и в распределении очагов сильнейших землетрясений исследуемой области. В данной работе проводится анализ особенностей зон локализации сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги на основе данных двух каталогов: регионального каталога Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН и глобального международного каталога USGS NIEC геологической службы США за 1990–2024 гг. Объединение каталогов на основе модифицированного метода "ближайшего соседа" позволило удалить дубликаты — повторяющиеся землетрясения в исходных каталогах — и получить новый единый каталог, состоящий из 52574 землетрясений. Метод "ближайшего соседа" применен для выделения двух подмножеств: независимых и связанных землетрясений в пространстве и времени, которые далее использовались для анализа плотности сейсмических событий. Полученные закономерности сопоставлены с очаговыми характеристиками сильнейших землетрясений зоны субдукции. Предложенный подход позволил выделить зоны локализации потенциально возможных очагов мегаземлетрясений вдоль Курило-Камчатской дуги.

Ключевые слова: Курило-Камчатская дуга, зона субдукции, землетрясения, метод "ближайшего соседа", дубликаты, контактные пятна, "асперити", зона разрыва.

DOI: 10.31857/S0002333725020028, **EDN:** DKRDPB

ВВЕДЕНИЕ

Курило-Камчатская дуга является объектом сейсмологических наблюдений на протяжении более 120 лет [Федотов и др., 2011; Ломтев и др., 2012; Rhea et al., 2010]. 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 и является "в первом приближении однородной протяженной структурой" [Федотов и др., 2011]. Современная Курило-Камчатская зона субдукции состоит из трех сегментов с разной историей тектонического развития и разными геодинамическими режимами: Восточно-Камчатского, Южно-Камчатского и Курильского [Авдейко

и др., 2002]. Южно-Камчатский сегмент с севера ограничен Малко-Петропавловской зоной поперечных дислокаций, выраженной в аномалии по геофизическим параметрам слэба [Гордеев, Бергаль-Кувикас, 2022] и в проявлении моногенного вулканизма, приуроченного к повышенной трещиноватости земной коры [Агибалов и др., 2023].

Исследование сейсмичности Курило-Камчатской дуги последних лет представлено в многочисленных работах ФИЦ ЕГС РАН, ИФЗ РАН, ИТПЗ РАН, ИЗК СО РАН и др. Детально сейсмичность Камчатского региона рассмотрена в работах [Федотов и др., 1985; Злобин, 1987; Гордеев и др., 2006; Чебров и др., 2022; и др.]. Активно развиваются методы прогноза землетрясений [Федотов, Соломатин, 2019; Чебров и др., 2021; Завьялов и др., 2022], исследования вулканической активности [Гирина и др., 2018; Озеров и др., 2020; Green et al., 2020], детального изучения глубинных структур [Кулаков и др., 2011; Мороз, Гонтовая, 2018; Бушенкова и др., 2022], проводятся программы по расширению и уплотнению сейсмических сетей [Чебров и др., 2021; Soubestre et al., 2019; Senyukov et al., 2024], разрабатываются и внедряются современные программы и новые методы для работы с сейсмологическими данными [Гордеев и др., 2014; Матвеенко и др., 2017; Абубакиров и др., 2018; Чеброва и др., 2020; Gusev et al., 1997; Skorkina et al., 2017].

Исследования распределения современной сейсмичности Курило-Камчатской зоны субдукции, выполненные на основе анализа различных каталогов (Геофизическая служба РАН и филиалы, NEIC, Гарвард и др.), показали, что большинство землетрясений расположено на глубинах до 80 км [Злобин и др., 2011]. При этом в положении эпицентров землетрясений наблюдается выраженная зональность при движении с востока на запад вкрест простирания Курило-Камчатской дуги. Обзор тектонической сейсмичности западной Камчатки за последние 40 лет показывает сотни слабых и средних землетрясений, часто группирующихся вдоль неявно выраженных разломов [Гордеев и др., 2006]. Сейсмофокальная зона представляет ослабленную многочисленными тектоническими нарушениями систему протяженных глубинных разломов, погружающуюся от глубоководной впадины к материку до глубин порядка 500–700 км под углом в среднем равным 50° [Симбирева и др., 1976; Полец, 2017; Rhea et al., 2010]. При этом наибольшее количество сильных глубокофокусных землетрясений Северного полушария за период инструментальных наблюдений зарегистрировано именно в пределах Курило-Камчатско-Охотского региона [Полец, 2017].

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 и его гармоники для Курило-Камчатской дуги. На основе инструментальных и исторических данных было установлено, что средняя продолжительность сейсмического цикла между двумя последовательными землетрясениями с магнитудой $M \geq 7.7$ в определенном месте составляет 140 ± 60 лет или 120 ± 50 лет [Федотов, Соломатин, 2019]. Предложенная концепция позволяет выделять особые участки наибольшей вероятности возникновения сильнейших землетрясений ($M \geq 7.7$) — сейсмические бреши [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019].

Переход к шкале моментных магнитуд, рассмотренный в работе [Гусев, Шумилина, 2004], позволил провести надежное статистическое исследование повторяемости землетрясений Камчатки (1737–2000 гг.) и выделить временные вариации повторяемости землетрясений средних магнитуд. А. А. Гусев и Л. С. Шумилина отмечают, что при статистическом анализе долговременных каталогов Камчатки наблюдается отклонение графика повторяемости от линейной зависимости, что приводит к существенной недооценке повторяемости сильнейших землетрясений.

Понятие сейсмической бреши как участка накопления сейсмической энергии можно ассоциировать с зонами неровностей (“асперити”, контактные пятна), буквально “прочные, напряженные” пятна, в окружении которых происходит частичный сброс напряжений в межсейсмический период [Кочарян, Кишкина, 2020]. Согласно работе [Lay et al., 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, особенное внимание уделяется изучению формы, размеров, пространственного распределения неровностей в зоне субдукции, а также феноменологическому наблюдению о приуроченности очагов повторных землетрясений к одному и тому же участку разлома [Кочарян, Кишкина, 2020]. Такие исследования подкрепляют методологические основы долгосрочного сейсмического прогноза С. А. Федотова по выделению наиболее вероятных мест будущих сильнейших землетрясений в местах накопления сейсмической энергии [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019]. Л. И. Лобковский с соавторами [Лобковский и др., 2013] также указывают на существующие аномалии поля современных движений земной поверхности по данным регистрации сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в Курило-Камчатской зоне субдукции.

Локальные особенности упругих характеристик земной коры, а также наличие зон сжатия и растяжения, находят отражение в очаговых параметрах землетрясений (функция источника (*source time function*), приведенная сейсмическая энергия E_s/M_0), которые описывают характеристики разрыва [Lay et al., 2009; Ye et al., 2018]. Таким образом, для понимания механизмов формирования сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги, исследования зоны разрыва необходимо изучать локальные особенности поля напряжений, в частности, особенности распределения неровностей (“асперити”).

В данной работе проведен комплексный анализ фоновой сейсмичности, выделенных афтершоковых последовательностей, а также параметров разрыва сильнейших землетрясений зоны субдукции. Используемый подход позволил выделить пространственно-временные особенности распределения сейсмичности в областях локализации сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В зоне субдукции в Курило-Камчатском вулканическом поясе происходит погружение Тихоокеанской океанической плиты под Евроазиатскую континентальную. Тихоокеанская плита опускается со скоростью ~ 80 мм/год, которая изменяется от 77 мм/год на 55° с. ш. до 83 мм/год на 47° с. ш. [DeMets et al., 1990; Steblov et al., 2003]. Сближение плит происходит почти перпендикулярно простиранию Камчатской зоны субдукции, и активные деформации внутри дуги относительно незначительны [Tibaldi, 2004].

Количественное сравнение магнитуд сильнейших землетрясений в различных зонах субдукции выявило закономерную связь размеров крупных землетрясений с двумя параметрами: возрастом субдуцирующей литосферы и скоростью сближения плит [Ruff, Kanamori, 1983; Kelleher, McCann, 1976]. Согласно работе [Ruff, Kanamori, 1983], самые крупные землетрясения происходят в зонах молодой литосферы и высокой скорости сближения плит, в то время как зоны со старой литосферой и малой скоростью сближения плит асейсмичны в отношении больших землетрясений. А. Ю. Полец [Полец, 2017] отмечает, что в целом сейсмическая активность и глубина до подошвы фокального слоя зависит от возраста островной дуги: ограничение распространения сейсмических событий на меньшие глубины происходит, когда активность уменьшается или дуга становится старше.

По результатам сейсмотомографии на поверхности слэба фиксируется Авачинский разлом [Бушенкова и др., 2022], который является южной границей аккреции Кроноцкой палеодуги в Восточно-Камчатском сегменте [Авдейко, Бергаль-Кувикас, 2015]. Существование зоны глубокофокусных землетрясений в районах Курильских островов и Южной Камчатки, а также особенности сейсмической структуры литосферы и мантии показывают, что юг Камчатки, как и Северные Курилы, находится под влиянием схожих тектонических процессов [Мороз, Гонтовая, 2018]. По наблюдениям авторов работы [Syracuse, Abers, 2006], с севера на юг изучаемого района происходит увеличение возраста слэба от 92 до 106 млн лет, увеличиваются скорость движения плиты с 77 до 79 км/млн лет и термальный параметр с 56 до 65 км.

Высокая изостатическая гравитация над восточным побережьем Камчатки отражает наличие холодной субдуцированной плиты и заканчивается примерно в 120 км к югу от Камчатско-Алеутского выступа субдукции. Вариации гравитационного поля вдоль зоны субдукции, часто совпадающие с изменениями морфологии и рельефа побережья, связаны

с изменчивой структурой передней дуги. Вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции отсутствие очагов сильных землетрясений на протяжении около 600 км к югу от 49° с. ш. совпадает с областью относительно высокой силы тяжести [Song, Simons, 2003].

Существование восходящего астеносферного потока в зоне стыка Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг было недавно подтверждено детальными сейсмотомографическими построениями по объемным волнам [Koulakov et al., 2020]. В работе [Кулаков и др., 2011] вдоль Курило-Камчатской дуги на глубине 50 км прослеживается четкое разделение литосферы на океаническую часть с повышенными скоростями сейсмических волн и окраинно-континентальную, которая характеризуется пониженными скоростями. Граница между этими двумя зонами проходит точно по Курильским островам и вблизи восточного побережья Камчатки. Такое зонирование можно объяснить различной структурой и составом литосферы в этих частях. Низкоскоростная сейсмическая аномалия под Камчаткой интерпретируется как утолщенная кора и литосфера континентального типа.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Территориально Курило-Камчатская дуга как объект исследования находится в зоне 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), каталогом мирового агентства ISC.

На данном этапе работы были использованы каталоги КФ ФИЦ ЕГС РАН и USGS NIEC за период инструментальных сейсмологических наблюдений с 1990 по 2024 гг. На рис. 1 представлены эпицентры землетрясений из различных каталогов в пределах Курило-Камчатской дуги. В табл. 1 представлена сводная информация о содержании каталогов сейсмических событий, включая количество событий в каталоге и магнитуду представительной регистрации M_C. Район

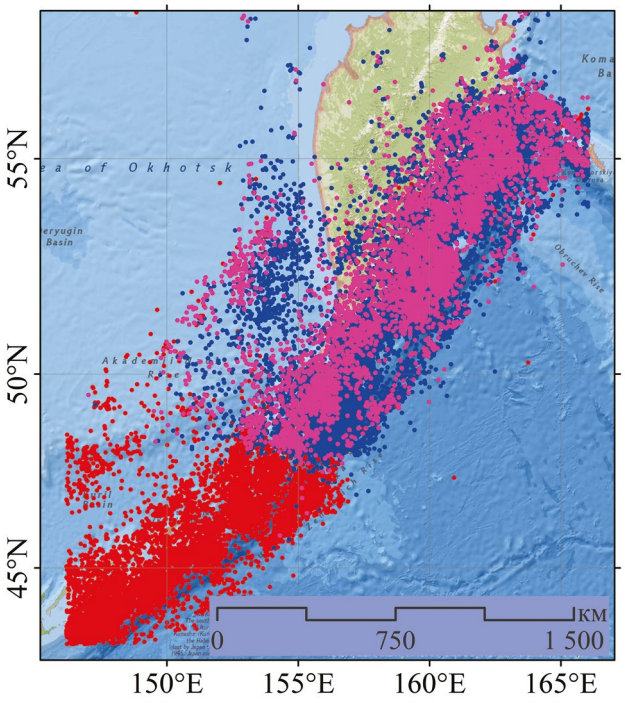

Рис. 1. Участок исследования Курило-Камчатской дуги с эпицентрами землетрясений из каталогов КФ ФИЦ ЕГС РАН (синий), USGS NIEC (красный), а также землетрясений, присутствующих в обоих каталогах (фиолетовый).

исследований ограничен координатами левого нижнего угла 42.90° с. ш., 146.18° в. д., правого верхнего угла 59.68° с. ш., 166.05° в. д. Для детальных исследований использовалась прямоугольная область 3257×719 км^2 с ориентацией на северо-восток (53°). Эта область охватывает сейсмофокальную зону Курило-Камчатской дуги. В пределах области детальных исследований были исключены землетрясения с глубиной гипоцентров более 200 км.

Многие события после сильных землетрясений могут быть пропущены из-за высокого уровня шума, который может возникать из-за технических ограничений разных конфигураций сетей регистрации [Vorobieva et al., 2022]. Использование для анализа результатов регистрации сейсмических событий из разных каталогов позволяет расширить объем выборки событий. Однако при таком подходе необходимо решать задачу удаления дубликатов — записей различных каталогов, относящихся к одному и тому же сейсмическому событию.

Объединение каталогов землетрясений представляется перспективным методом улучшения

Таблица 1. Параметры каталогов

Источник	Количество событий	Магнитуда M_c	Параметры закона Гутенберга–Рихтера	
			a	b
USGS NIEC (Геологическая служба США)	16322	3.92	8.10	0.97
КФ ФИЦ ЕГС РАН	39006	2.96	8.24	1.04
Объединенный каталог	52574	3.89	8.49	0.99
Объединенный каталог после удаления дубликатов	46479	3.34	8.06	0.95
Объединенный каталог после удаления связанных событий	41252	3.96	10.79	1.57

полноты и представительности сейсмического каталога различных регионов [Zare et al., 2014; Sawires et al., 2019; Gvishiani et al., 2022]. Наиболее часто для эпицентральных расстояний и времени используется заданное пороговое значение для событий из разных каталогов, в пределах которых записи могут быть потенциальными дубликатами. П. Н. Шебалин [Шебалин, 2018] отмечает, что достаточно надежным подходом для выделения афтершоковых последовательностей (иначе, связанных событий) является корреляционный вариант пространственно-временной метрики, предложенный в работе [Baiesi, Paczuski, 2004] и дополненный методом определения порогового значения [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013]. Данный метод основан на представлении потока сейсмических событий в виде двух множеств: (1) землетрясений, которые являются независимыми, и (2) землетрясений, возникающих как следствие других землетрясений (связанные события) [Шебалин, 2018]. Если определить в пространстве "время — магнитуда" меру связи между землетрясениями, то сейсмичность может быть представлена деревом связей между "ближайшими соседями". Корреляционная метрика (функции "ближайшего соседа") для каждой пары события $\{i, j\}$ имеет вид [Zaliapin et al., 2008]:

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}\left(r_{ij}\right)^d 10^{-bM_i}, t_{ij} > 0 \\ +\infty, t_{ij} \le 0 \end{cases}, \qquad (1)$$

где: $t_{ij} = (t_j - t_i)$ — время между двумя событиями; $r_{ij} = (r_j - r_i)$ — расстояние между двумя событиями; M_i — магнитуда события; d — фрактальная размерность пространственного распределения землетрясений; b — наклон распределения Гутенберга–Рихтера. Для расчета фрактальной размерности d, которая определяет вес пространственной компоненты относительно веса временной компоненты, был использован метод Минковского–Буле (*box-counting*) на основе местоположений эпицентров землетрясений [Falconer, 1990]. Далее для каждого события j определялся его уникальный "ближайший сосед" i на основе минимизации метрики η_{ij}:

$$\eta_{ij} = \min\left(\eta_{ij}, i < j\right). \qquad (2)$$

Нормированное время и расстояние на магнитуду события можно представить в виде [Zaliapin et al., 2008]:

$$T_{ij} = \tau_{ij} 10^{-bM_i/2}, \quad R_{ij} = r_{ij}^d 10^{-bM_i/2}, \qquad (3)$$

где $\eta_{ij} = T_{ij} R_{ij}$. Такое представление удобно использовать для визуализации результата разделения множеств.

В работе [Vorobieva et al., 2022] предложена двухэтапная модификация метрики "ближайшего соседа" для разделения афтершоков (связанных событий) и дубликатов в объединенном каталоге, которые происходят близко в пространстве и времени (рис. 2):

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

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

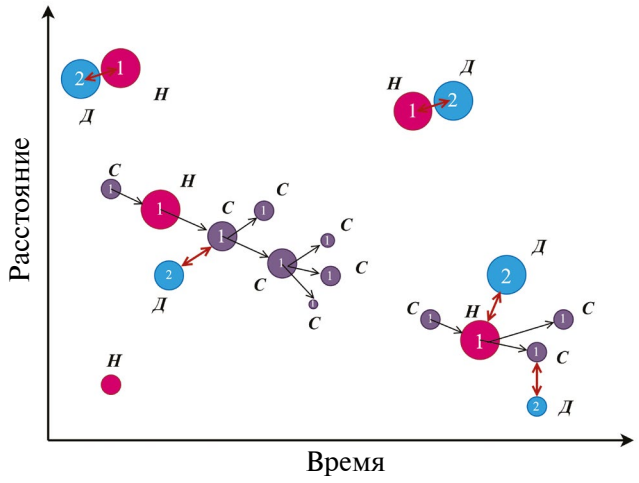

Рис. 2. Схема, поясняющая работу алгоритма идентификации дубликатов и декластеризации на основе метрики “ближайшего соседа” в пространстве и времени. Цифры в кружках определяют принадлежность события к каталогу. Буквами обозначены: *Н* — независимые события, *С* – связанные события, *Д* — дубликаты.

В данной работе при объединении каталогов использовались следующие атрибуты: координаты эпицентра, глубина гипоцентра, дата и время события, моментная магнитуда. Из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН были исключены данные, превышающие 2 стандартных отклонения от среднего значения ошибки по глубине и эпицентральному расстоянию. Для каталога NEIC (USGS) использовались данные, которые были классифицированы как землетрясения. События, для которых в обоих каталогах присутствовали нулевые значения глубины для гипоцентров, также были исключены из дальнейшего анализа.

Также была проведена унификация магнитуд отобранных землетрясений, был выполнен переход к шкале моментных магнитуд M_w. Для каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН использовалась регрессионная зависимость из работы [Абубакиров и др., 2018]. Для событий, выходящих за диапазон использования регрессионной модели, значения M_w уточнялись по каталогу GCMT (Гарвард). Для событий из каталога NEIS (USGS) для значений магнитуд, рассчитанных по данным сейсмического момента, использовались исходные значения; для магнитуд m_b проводился пересчет в локальную магнитуду ML, а затем в моментную магнитуду M_w [Чубарова и др., 2010; Абубакиров и др., 2018].

В качестве основного каталога был выбран каталог КФ ФИЦ ЕГС РАН, все события которого были помечены категорией “1”. События каталога USGS NIEC получили категорию “2”. Такой выбор не влияет на результат идентификации дубликатов, поскольку задача поиска “ближайшего соседа” является симметричной [Vorobieva et al., 2022]. Алгоритм устанавливает соответствие между событиями из двух каталогов, после чего выполняется классификация землетрясений на уникальные и дубликаты, используя метод иерархической агломеративной кластеризации Уорда [Ward, 1963] в мерах евклидовой метрики (рис. 3). Рисунок 3 построен в координатах $DT_\sigma = DT/\sigma_T$ и $DT_\sigma = \sqrt{\frac{DX^2}{\sigma_X^2} + \frac{DY^2}{\sigma_Y^2}}$, где DT, DX, DY — разница во времени и координатах для двух событий; $\sigma_T, \sigma_X, \sigma_Y$ — соответствующие среднеквадратичные отклонения случайных величин. Проверка корректности идентификации дубликатов проводилась в предположении нормального распределения параметров DT, DX, DY и слабой зависимости дисперсии от магнитуды и времени события [Vorobieva et al., 2022; Gvishiani et al., 2022].

Для каждого исходного каталога, объединенного каталога и всех последующих процедур преобразования объединенного каталога

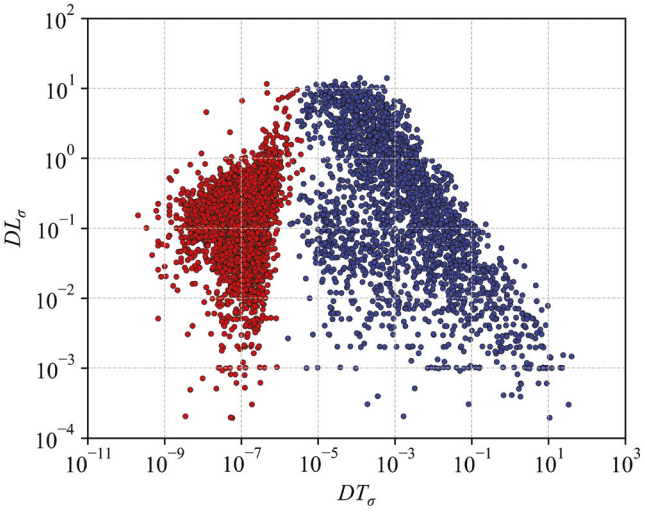

Рис. 3. Пространственно-временная структура результатов идентификации дубликатов, где $DT_\sigma = DT/\sigma_T$, $DL_\sigma = \sqrt{\frac{DX^2}{\sigma_X^2} + \frac{DY^2}{\sigma_Y^2}}$. Красным цветом показаны события, идентифицированные как дубликаты, синим — связанные события.

(идентификация и удаление дубликатов, декластеризация) проведена оценка полноты с определением представительной магнитуды M_C. Оценка полноты каталога землетрясений проводилась по методу, описанному в работе [Wiemer, 2000]. Выполнялась проверка гипотезы на соответствие модельному распределению Гутенберга–Рихтера. Результаты определения M_C и параметров a, b закона повторяемости представлены в табл. 1. Следует отметить, что в работах [Гусев, Шумилина, 2004; Vorobieva et al., 2018] статистически подтверждено наличие существенных флуктуаций уровня сейсмичности, что влияет на результат оценки полноты каталогов и вариацию представительной магнитуды в пространстве и времени. В работе [Чебров и др., 2013] показано, что расстановка системы наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН позволяет регистрировать события с представительной магнитудой для всего региона — 3.5. При этом оценка 2.96 является артефактом, связанным с тем, что при совокупном анализе всего каталога оценка локального весьма представительного района вблизи г. Петропавловск-Камчатский и групп вулканов влияет на значения магнитуды M_C, полученной по всей территории.

После исключения из анализа землетрясений-дубликатов проводилась декластеризация объединенного каталога. Фоновая сейсмичность (независимые события) моделировалась как пуассоновское поле со стационарной временной компонентой, равномерной случайной пространственной компонентой и распределением магнитуд по закону Гутенберга–Рихтера [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013]. Была проведена генерация независимых событий и расчета метрики “ближайшего соседа” η_{ij} для синтетического каталога с учетом области исследования, количества событий, представительной магнитуды, временного интервала наблюдений, фрактальной размерности и параметра b закона Гутенберга–Рихтера.

Наблюдаемая сейсмичность следует бимодальному распределению метрики “ближайшего соседа”: одна из мод аналогична таковой в пуассоновском поле (независимые события), другая же — представлена событиями, расположенными значительно ближе во времени и пространстве, то есть представляют кластеры связанных событий. Используя в качестве порогового значения 1-й процентиль, который был предложен в работе [Ostapchuk et al., 2022] и который равен в нашем случае -4.58, была проведена декластеризация объединенного каталога на независимые и связанные множества событий (рис. 4). Расчетное пороговое значение было определено по результатам моделирования синтетического каталога землетрясений, распределение которых в пространственно-временных координатах соответствует пуассоновскому полю [Zaliapin et al., 2008; Zaliapin, Ben-Zion, 2013]. Анализируя как одномерное распределение метрики “ближайшего соседа” η_{ij}, так и двумерное распределение нормированных параметров времени и расстояния, был выбран порог, по которому 99% всех событий рассматривались как независимые.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ данных многолетних наблюдений сейсмической активности позволяет получить уникальную информацию о структуре очагов землетрясений, характере постсейсмических процессов и широко применяется для оценок сейсмической опасности [Шебалин, 2018]. При этом именно процедура декластеризации потока сейсмических событий, которая позволяет разделить все землетрясения из каталога на независимые (фоновая сейсмичность) и связанные землетрясения (форшоки и афтершоки, которые формируют кластерную сейсмичность), расширяет возможности интерпретации сейсмических данных. Исследование афтершоковых последовательностей проводится для изучения очага сильных землетрясений, выделения области локализации разрыва, хотя вопрос корректности использования размеров зоны афтершоков для оценки области разрыва остается открытым для дальнейших исследований [Yabe, Ide, 2018; Neo et al., 2021]. Например, для землетрясений в Калифорнии с $M > 5.4$ получено, что площадь области афтершоков составляет 0.5–5.4 площади разрыва основного землетрясения [Neo et al., 2021]. В свою очередь каталоги независимых землетрясений используют для выделения зон формирования контактных пятен (“асперити”) в плоскости разлома [Ostapchuk et al., 2022]. Можно предполагать, что комплексный анализ фоновой и кластерной сейсмичности позволит выделить

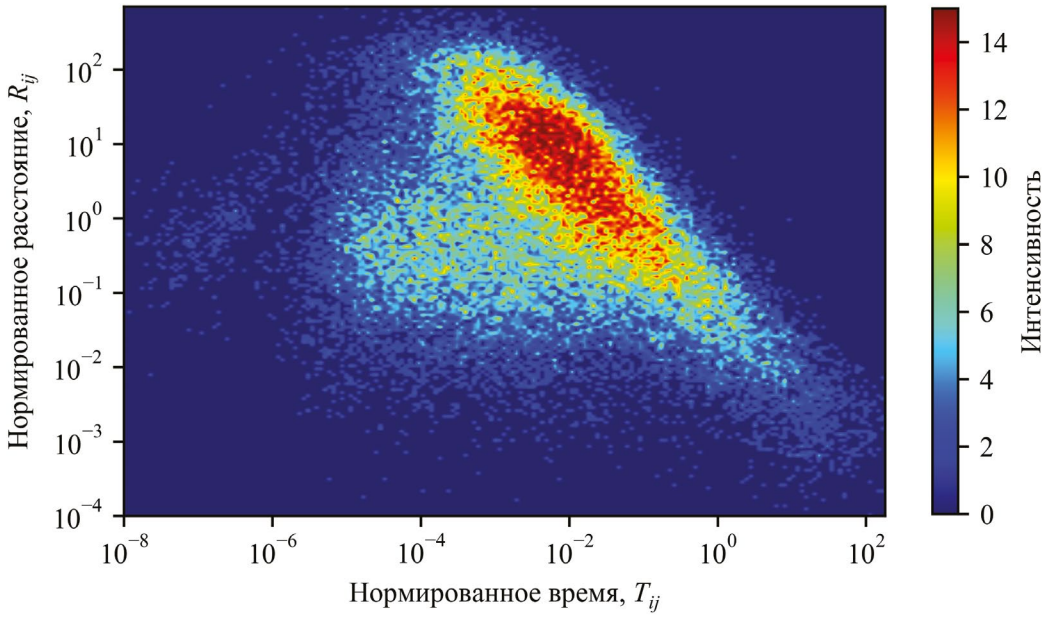

Рис. 4. Распределение функции “ближайшего соседа” для событий объединенного каталога в осях нормированного времени и расстояния.

наиболее вероятные участки локализации неровностей поверхности скольжения разломной зоны.

Результаты декластеризации объединенного каталога Курило-Камчатской дуги за период с 1990 по 2024 гг. приведены на рис. 5. Оба множества независимых и связанных событий по большей части группируются в одних и тех же областях зоны субдукции, хотя присутствуют очевидные различия (рис. 5).

Для более детального исследования двух множеств событий были построены карты нормированной плотности количества землетрясений (рис. 6). 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. Полученные карты плотности сопоставлены с областями разрывов сильнейших ($M \geq 7.8$) землетрясений Курило-Камчатской дуги (табл. 2), построенными на основе распределения облака афтершоков [Johnson, Satake, 1999; Burgmann et al., 2005; Rhea et al., 2010]. Наиболее интенсивная область на карте фоновой сейсмичности (рис. 6а) соответствует области наибольшего смещения по разлому при катастрофическом землетрясении 1952 г. с $M_w = 9.0$, при котором произошел срыв трех зон “асперити” с общей областью разрыва протяженностью 600–700 км [Johnson, Satake, 1999]. Эпицентральная область этого события, наоборот, более интенсивно проявляется

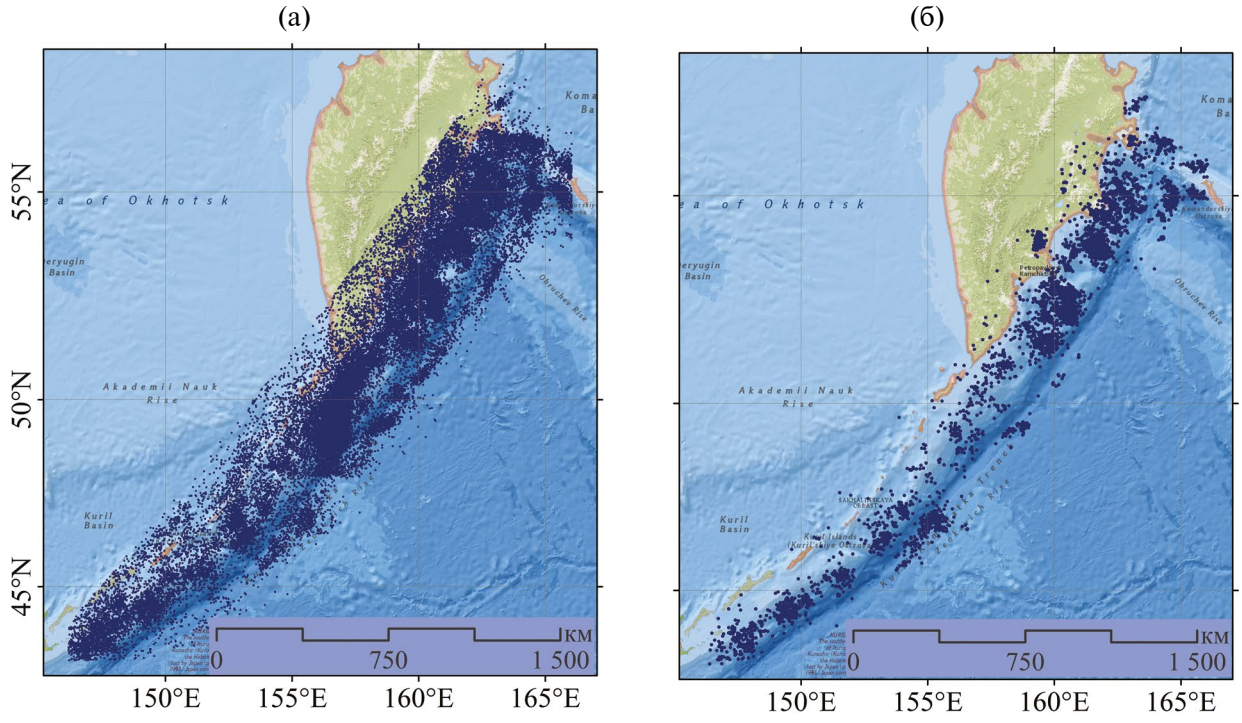

Рис. 5. Независимые (а) и связанные (б) землетрясения, полученные после объединения двух каталогов (удаления дубликатов) и последующей декластеризации полученного объединенного каталога.

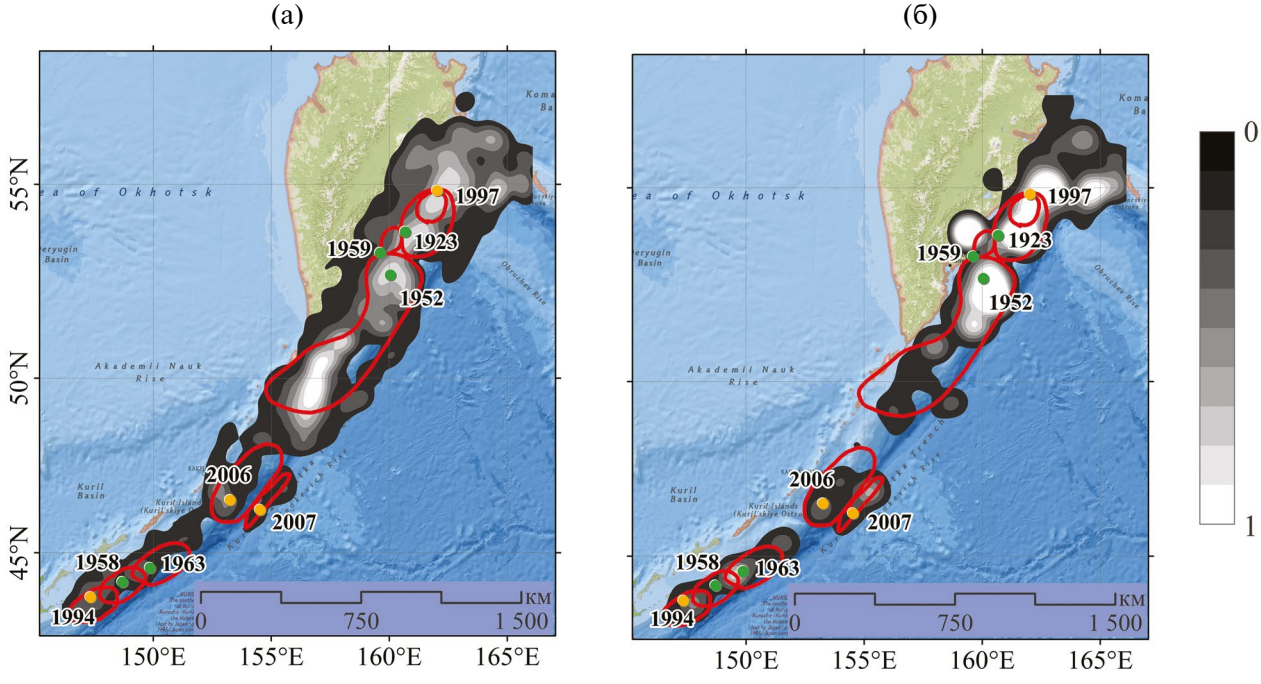

Рис. 6. Карты плотности количества независимых (а) и связанных (б) землетрясений в сопоставлении с областями разрыва (красные линии) сильнейших землетрясений ($M \geq 7.8$) Курило-Камчатской дуги из табл. 2. Эпицентры землетрясений до 1990 г. отмечены зелеными точками, после 1990 г. — желтыми точками. Цифрами обозначен год события.

Таблица 2. Сильнейшие землетрясения Курило-Камчатской дуги с $M \geq 7.8$

№	Дата	M_w	Источник
1	03.02.1923	8.5	[Burgmann et al., 2005]
2	04.11.1952	9.0	[Burgmann et al., 2005]
3	06.11.1958	8.4	[Rhea et al., 2010]
4	04.05.1959	8.2	[Johnson, Satake, 1999]
5	13.10.1963	8.5	[Rhea et al., 2010]
6	04.10.1994	8.3	[Rhea et al., 2010]
7	05.12.1997	7.8	[Burgmann et al., 2005]
8	15.11.2006	8.3	[Rhea et al., 2010]
9	13.01.2007	8.1	[Lay et al., 2009]

на карте связанных событий (рис. 6б), охватывая также зоны афтершоков землетрясений 1923 г., 1997 г., а также частично зону землетрясения 1959 г. При этом на карте кластерной сейсмичности (рис. 6б) отмечается отсутствие событий в интервале 47–48.5° северной широты. Стоит отметить, что землетрясения 1923, 1952 и 1959 гг. выходят за временной интервал анализа сейсмичности в данной работе (1990–2024 гг.), однако их очаговые области находят отражение на картах плотности событий. Усиление интенсивности плотности как для связанных, так и для независимых событий наблюдается при всех сильнейших землетрясениях Курило-Камчатской дуги за инструментальный период наблюдений (табл. 2).

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. Полученная объединенная карта представлена на рис. 7 в сопоставлении с очагами землетрясений с $M_w \geq 7$ за 1990–2024 гг.

Эпицентры всех отмеченных землетрясений расположены в местах усиления интенсивности плотности событий. Для каждого землетрясения показана функция источника (*source time function*), полученная из базы данных SCARDEC [Vallée, Douet, 2016] http://scardec.projects.sismo.ipgp.fr/Vallee_Douet_SCARDECdatabase_PEPI2016.pdf. Функция источника описывает процесс распространения разрыва в очаге. Как правило, наличие нескольких выраженных экстремумов этой функции связывают со сложной структурой очаговой области, существованием неровностей (нескольких контактных пятен) в области разрыва. Как видно на рис. 7, для Курило-Камчатской зоны субдукции характерна простая — однокупольная форма функции источника, исключения составляют землетрясения 2006 и 2020 гг. с выраженными тремя и двумя максимумами соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

С учетом существующих представлений геомеханики разломов для сейсмогенной зоны на поверхности скольжения сильнейших землетрясений характерно наличие неровностей (“асперити”), которые занимают значительную контактную площадь и представляют собой участки фрикционной нестабильности со свойствами скоростного разупрочнения. Как правило, на таких участках происходит старт динамического разрыва [Scholz, 2019; Кочарян, Кишкина, 2020]. Асейсмические участки, а также области за пределами сейсмогенной зоны обладают свойствами скоростного упрочнения, на таких участках происходит снижение скорости разрыва и остановка, если размер участка достаточно велик. Также существуют почти нейтральные “фоновые” по отношению к скорости и смещению берегов разлома зоны.

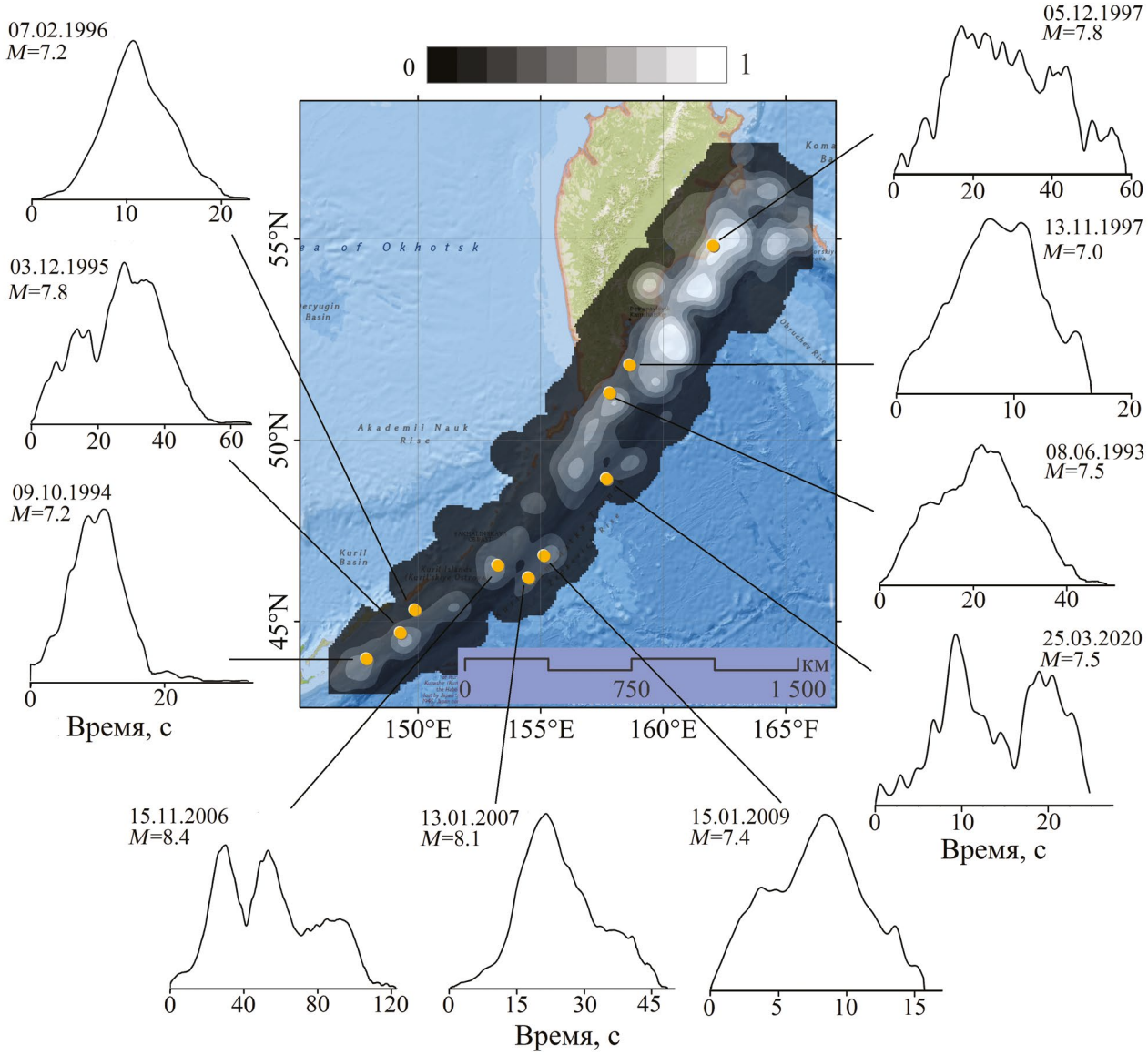

Рис. 7. Объединенная карта плотности количества независимых и связанных событий. Желтыми символами отмечены землетрясения с $M_w \geq 7$ за 1990–2024 гг. Для каждого землетрясения показана функция источника из базы данных SCARDEC [Vallée, Douet, 2016].

Построенная объединенная карта плотности количества фоновых и кластеризованных (связанных) событий использовалась для выделения предполагаемых областей “асперити” на поверхности скольжения, которые представляют собой участки повышенной плотности сейсмических событий (более светлые области на рис. 7 и рис. 8). Полученные результаты сопоставлялись с существующими представлениями о структуре зоны субдукции Курило-Камчатской дуги (рис. 8). В модели 1 предполагается, что “асперити” соответствуют распределению области афтершоков сильнейших землетрясений за инструментальный период наблюдений (рис. 6) [Johnson, Satake, 1999; Burgmann et al., 2005; Rhea et al., 2010]. В модели 2 распределение зон “асперити” построено с помощью численного моделирования на основе областей наи-

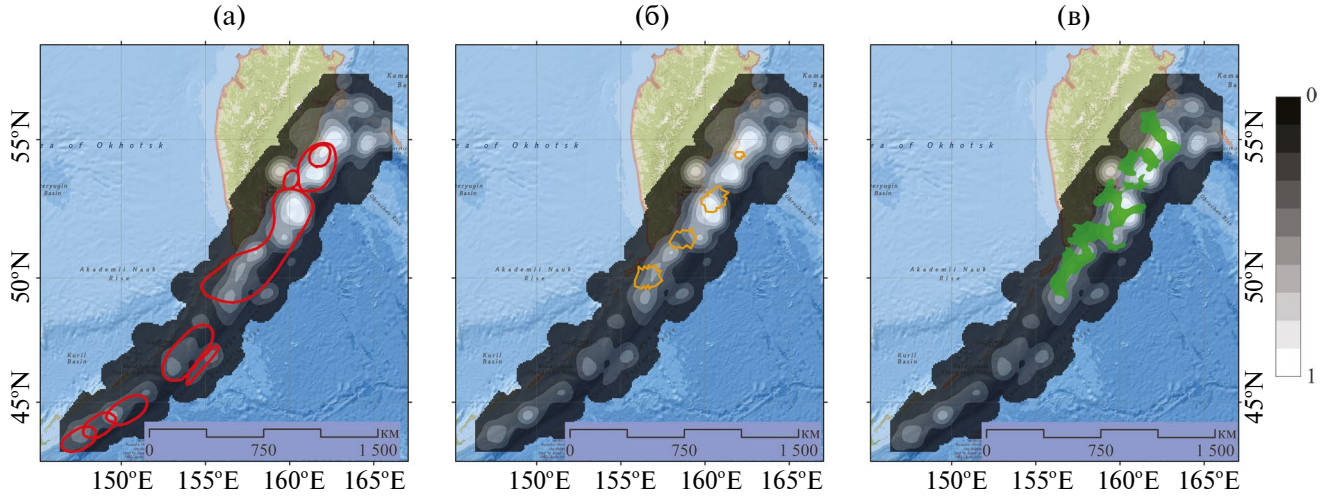

Рис. 8. Объединенная карта плотности количества событий в сопоставлении с моделями “асперити” для Курило-Камчатской зоны субдукции: (а) модель 1 [Johnson, Satake, 1999; Burgmann et al., 2005; Rhea et al., 2010], линии красного цвета; (б) модель 2 [Burgmann et al., 2005], линии желтого цвета; (в) модель 3 [Vorobieva et al., 2018], области зеленого цвета.

большего смещения по разлому при некоторых землетрясениях [Burgmann et al., 2005]. В модели 3 на основе анализа графика повторяемости выделены области сильного (“асперити”) и слабого (асейсмические деформации) сцепления вдоль области разлома; первые соответствуют областям, где происходит больше сильных землетрясений, вторые — областям, где чаще происходят более слабые события [Vorobieva et al., 2018].

Стоит отметить, что использование модели 1 может давать завышенные размеры областей “асперити”. Во-первых, как отмечалось ранее, облако афтершоков может превышать размеры области разрыва [Neo et al., 2021]. Во-вторых, обобщение опубликованных данных, проведенное в работе [Кочарян, Кишкина, 2020], показывает, что протяженность контактных пятен (областей “асперити”) в среднем в 1.5–3 раза меньше, чем длина разрыва. Таким образом, линейный размер области “асперити” может быть существенно меньше размера облака афтершоков. Модель 2 очерчивает существенно меньшую площадь по сравнению с моделью 1. В качестве контактных пятен рассматриваются три локальных участка области разрыва землетрясения 1952 г. (M_w 9.0), на которых смещение по разлому составило больше 6 м [Johnson, Satake, 1999]. Здесь “асперити” рассматриваются как полностью замкнутые области, которые не излучают сейсмические колебания на межсейсмической стадии, они окружены областями, по которым может происходить асейсмическое скольжение. Для получения лучшей сходимости данных при инверсии со скоростью и направлением движения поверхности на основе GPS-данных авторы работы [Burgmann et al., 2005] дополнили модель областью “асперити”, соответствующей Кроноцкому землетрясению 1997 г. (M_w 7.8). Модель 3 основана на анализе декластеризованного сейсмического каталога Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН за 1997–2017 гг. Она показывает хорошее соответствие расположения участков сильного сцепления с областями повышенной плотности событий на объединенной карте, полученной в данной работе.

Стоит отметить, значительную опасность могут представлять не только сами области “асперити”, где может произойти срыв контактных пятен при землетрясении, но также совместный срыв нескольких областей, который может привести к более сильному событию. Например, вдоль Курило-Камчатской дуги С. А. Федотов и А. В. Соломатин [Федотов, Соломатин, 2019] выделяют в среднем до 20 участков наибольшей вероятности возникновения сильнейших землетрясений с длиной разрыва от 100 до 200 км и шириной 50 или 100 км. Авторы 5-летних сейсмических прогнозов [Федотов и др., 2011; Федотов, Соломатин, 2019] неоднократно указывают, что в связи с накопленной нереализованной упругой энергией в пределах Курило-Камчатской дуги существует потенциальная возможность

возникновения мегаземлетрясения с $M \geq 8.5$, способного охватить (объединить) несколько сейсмических брешей. При этом средняя вероятность сильных землетрясений ($M \geq 7.7$), происходящих в любом заданном месте зоны субдукции в течение пяти лет (2019–2024 гг.), находится в пределах от 3.6% до 4.2% [Федотов, Соломатин, 2019].

Результаты численного моделирования также указывают на то, что в очаге сильных землетрясений происходит почти одновременный срыв нескольких контактных зон [Dragoni, Tallarico, 2016; Будков, Кочарян, 2021; Кочарян, Остапчук, 2022]. Восстановление распределения смещений в очаге для сильных землетрясений часто демонстрирует наличие нескольких контактных зон, например, землетрясение на Камчатке 1952 г. с $M_w = 9.0$ [Johnson, Satake, 1999], землетрясение на Аляске 1964 г. с $M_w = 9.2$ [Christensen, Beck, 1994], землетрясение Ландерс 1992 г. с $M_w = 7.3$ [Kanamori et al., 1992], землетрясение в Кобе 1995 г. с $M_w = 6.9$ [Kikuchi, Kanamori, 1996], землетрясение Паркфилд 2004 г. с $M_w = 6.2$ [Johanson et al., 2006], землетрясение Мауле 2010 г. с $M_w = 8.8$ [Delouis et al., 2010] и др.

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”. Выделение контура, соответствующего области разрыва потенциального землетрясения, выполнено методом оптимизации Дженкса. Границы классов создаются таким образом, чтобы наилучшим образом сгруппировать схожие значения и максимизировать различия между классами (минимизация дисперсии внутри классов и максимизация дисперсии между классами). Пороговым значением для выделения областей на объединенной карте плотности событий было выбрано значение 0.12. При этом из рассмотрения были исключены внутриплитные землетрясения (область афтершоков Симуширского землетрясения 2007 г.), области сочленения Алеутской и Курило-Камчатской дуг, а также материковые области афтершоков в районе вулканов Жупановский и Карымский (рис. 9).

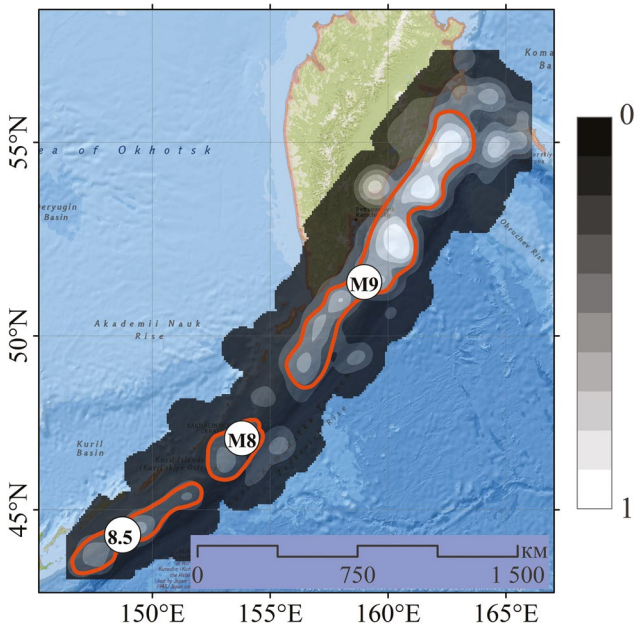

Рис. 9. Объединенная карта плотности независимых и связанных событий. Оранжевые линии очерчивают контуры, соответствующие областям разрыва потенциальных сильнейших землетрясений Курило-Камчатской дуги с магнитудами 8, 8.5 и 9.

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]:

$$M_0 = 4.57 \cdot 10^{15} \cdot L^{2.26}. \quad (4)$$

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: 708.5, 332.5 и 1468 км. Области разрыва таких событий могут представлять собой объединение от 2 до 5 зон “асперити”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной работе подход позволил расширить район исследования за счет объединения двух исходных каталогов и провести анализ сейсмичности во всей зоне субдукции Курило-Камчатской дуги. В качестве инфор-

мативного параметра была выбрана плотность сейсмических событий. На картах плотности независимых и связанных событий за последние 34 года наблюдений (с 1990 г.) выделяются эпицентральные зоны и области наибольших смещений при разрывах сильнейших землетрясений за инструментальный период наблюдений (с 1923 г.). Это соответствует представлению о том, что крупные землетрясения контролируются расположением зон “асперити”, информация о которых находит отражение как в особенностях сейсмического режима фоновых землетрясений, так и в кластерной сейсмичности.

Совместный анализ плотности независимых и связанных землетрясений показал хорошее соответствие между построенной моделью зон “асперити” и независимыми моделями, построенными на основе распределения области афтершоков сильнейших землетрясений, областей наибольшего смещения по разлому при некоторых сильных землетрясениях, а также областей сильного и слабого сцепления, полученных при анализе сейсмических каталогов.

Выделены области, которые могут соответствовать зонам локализации потенциально возможных очагов мегаземлетрясений с магнитудами 8, 8.5 и 9. События таких магнитуд могут произойти при одновременном срыве нескольких контактных пятен на плоскости разлома.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору, докт. физ.-мат. наук Г.Г. Кочаряну и канд. физ.-мат. наук А.А. Остапчуку за ценные комментарии, советы и замечания при подготовке статьи. Авторы также выражают благодарность анонимным рецензентам за внимательное прочтение статьи и сделанные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Концептуализация исследования и формулировка научных задач выполнена А. Н. Бесединой в рамках проекта Российского научного фонда № 22-17-00204. Решение научных задач выполнено в рамках проекта научной школы “Геофизика природных катастроф” при финансовой поддержке Фонда целевого капитала МФТИ. Обсуждение и представление результатов выполнены в рамках геофизической школы на мероприятии-спутнике Конгресса молодых ученых в г. Петропавловск-Камчатский.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абубакиров И. Р., *Гусев А. А.*, *Гусева Е. М.*, *Павлов В.М.*, *Скоркина А.А.* Массовое определение моментных магнитуд M_w и установление связи между M_w и M_L для умеренных и слабых камчатских землетрясений // Физика Земли. 2018. № 1. С. 37–51.

Агибалов А.О., *Бергаль-Кувикас О.В.*, *Зайцев В.А.*, *Макеев В.М.*, *Сенцов А.А.* Взаимосвязь морфометрических параметров рельефа, характеризующих трещиноватость верхней части литосферы, и проявлений вулканизма Малко-Петропавловской зоны // Геофизические процессы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 122-133.

Авдейко Г.П., *Бергаль-Кувикас О.В.* Геодинамические условия образования адакитов и NB-обогащенных базальтов (NEAB) на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 1–13.

Авдейко Г.П., *Попруженко С.В.*, *Палуева А.А.* Тектоническое развитие и вулкано-тектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 4. С. 64.

Будков А.М., *Кочарян Г.Г.* Численное моделирование распространения сверхсдвигового разрыва по разломам с однородной и гетерогенной поверхностью // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 10–19.

Бушенкова Н.А., *Бергаль-Кувикас О.В.*, *Гордеев Е.И.*, *Чебров Д.В.*, *Кулаков И.Ю.*, *Абкадыров И.Ф.*, *Яковлев А.В.*, *Ступина Т.А.*, *Новгородова А.М.*, *Дрознина С.Я.* Структура надсубдукционного комплекса центральной зоны Камчатки по данным плотных сейсмологических сетей. Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога / Озеров А.Ю. (ред.). 2022. С. 95–98.

Гирина О.А., *Лупян Е.А.*, *Сорокин А.А.*, *Мельников Д.В.*, *Романова И.М.*, *Кашницкий А.В.*, *Уваров И.А.*, *Мальковский С.И.*, *Королев С.П.*, *Маневич А.Г.*, *Крамарева Л.С.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. 192 с.

Гордеев Е.И., *Бергаль-Кувикас О.В.* Строение и вулканизм зоны субдукции на Камчатке // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 72–76.

Гордеев Е.И., *Гусев А.А.*, *Левина В.И.*, *Леонов В.Л.*, *Чебров В.Н.* Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38.

Гордеев Е.И., *Гирина О.А.*, *Лупян Е.А.*, *Сорокин А.А.*, *Ефремов В.Ю.*, *Мельников Д.В.*, *Маневич А.Г.*, *Романова И.М.*, *Королев С.П.*, *Крамарева Л.С.* Возможности использования данных гиперспектральных спутниковых наблюдений для изучения активности вулканов Камчатки с помощью геопортала Volsatview // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 267–284.

Гусев А.А., *Шумилина Л.С.* Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.

Завьялов А.Д., *Морозов А.Н.*, *Алешин И.М.*, *Иванов С.Д.*, *Холодков К.И.*, *Павленко В.А.* Метод среднесрочного прогноза землетрясений “Карта ожидаемых землетрясений” (КОЗ): опыт использования и перспективы развития // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 2. С. 114–131.

Злобин Т.К., *Сафонов Д.А.*, *Полец А.Ю.* Распределение землетрясений по типам очаговых подвижек в Курило-Охотском регионе // Докл. РАН. 2011. Т. 440. № 4. С. 527–529.

Злобин Т.К., *Пискунов В.Н.*, *Фролова Т.И.* Новые данные о структуре земной коры в центральной части Курильской островной дуги // Докл. АН СССР. 1987. Т. 293. № 2. С. 185.

Кочарян Г.Г., *Кишкина С.Б.* Физическая мезомеханика очага землетрясения // Физическая мезомеханика. 2020. Т. 23. № 6. С. 9–24.

Кочарян Г.Г., *Остапчук А.А.* Мезоструктура зоны скольжения тектонического разлома // Физическая мезомеханика. 2022. Т. 25. № 5. С. 94–105.

Кулаков И.Ю., *Добрецов Н.Л.*, *Бушенкова Н.А.*, *Яковлев А.В.* Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 6. С. 830–851.

Лобковский Л.И., *Габсатаров Ю.В.*, *Алексеев Д.А.*, *Владимирова 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.

Ломтев В Л. К строению и истории Курило-Камчатского глубоководного желоба (СЗ Пацифика) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2012. № 3. С. 36–47.

Матвеенко Е.А., *Чеброва А.Ю.*, *Иванов В.Ю.*, *Иванова Е.И.*, *Митюшкина С.В.*, *Раевская А.А.*, *Ромашева Е.И.*, *Токарев А.В.*, *Чемарев А.С.* Развитие интерфейса доступа к сейсмологической информации ЕИССД. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 2017. С. 1–7.

Мороз Ю.Ф., *Гонтовая Л.И.* О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1147–1161.

Озеров А.Ю., *Гирина О.А.*, *Жаринов Н.А.*, *Белоусов А.Б.*, *Демянчук Ю.В.* Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 3–19.

Полец А.Ю. Глубокофокусные землетрясения и тектоническое поле современных напряжений в Курило-Охотском регионе // Вестник Дальневосточного отделения РАН. 2017. № 1 (191). С. 26–37.

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.

Федотов С.А., *Славина Л.Б.* Оценка скоростей продольных волн в верхней мантии под северо-западной частью Тихого океана и Камчаткой // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1968. № 2. С. 8–31.

Федотов С.А., *Соломатин А.В.* Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-v 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.

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.

Федотов С.А., *Гусев А.А.*, *Чернышева Г.В.*, Шумилина Л.С. Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов в ней, связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 91–107.

Чебров В.Н., *Дрознин Д.В.*, *Кугаенко Ю.А.*, *Левина В.И.*, *Сенюков С.Л.*, *Сергеев В.А.*, *Ящук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18.

Чебров Д.В., *Салтыков В.А.*, *Дрознина С.Я.*, *Ромашева Е.И.*, *Митюшкина С.В.*, *Абубакиров И.Р.*, *Павлов В.М.*, *Раевская А.А.*, *Матвеенко Е.А.* Сейсмичность Камчатки и Командорских островов в 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2022. № 25. С. 164–175.

Чебров Д.В., *Тихонов С.А.*, *Дрознин Д.В.*, *Дрознина С.Я.*, *Матвеенко Е.А.* Система сейсмического мониторинга и прогнозирования на Камчатке и ее развитие. Основные результаты наблюдений в 2016–2020 гг. //Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 3. С. 28–49.

Чеброва А.Ю., *Чемарев А.С.*, *Матвеенко 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.

Чубарова О.С., *Гусев А.А.*, *Чебров В.Н.* Свойства колебаний грунта при Олюторском землетрясении 20.04.2006 г. и его афтершоках по данным цифровой регистрации // Вулканология и сейсмология. 2010. № 2. С. 57–70.

Шебалин П.Н. Математические методы анализа и прогноза афтершоков землетрясений: необходимость смены парадигмы // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19 (4). С. 227–242.

https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-227-242

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.

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.

Christensen D.H., *Beck S.L.* The rupture process and tectonic implications of the great 1964 Prince William Sound earthquake // Pure and applied geophysics. 1994. V. 142. P. 29–53.

Delouis B., *Nocquet J.M.*, *Vallée M.* Slip distribution of the February 27, 2010 M_w = 8.8 Maule earthquake, central Chile, from static and high–rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37. № 17.

DeMets C., *Gordon R.G.*, *Argus D.F.*, *Stein S.*, Current plate motions // Geophysical Journal International. 1990. V. 101. № 2. P. 425–478.

Dragoni M., *Tallarico A.* Complex events in a fault model with interacting asperities // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2016. V. 257. P. 115–127.

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.

Green R.G., *Sens-Schönfelder C.*, *Tilmann F.*, *Dreiling J.*, *Luehr B.*, *Shapiro N.*, *Koulakov I.*, *Jakovlev A.*, *Abkadyrov I.*, *Gordeev E.*, *Droznin D.* Magmatic and sedimentary structure beneath the Klyuchevskoy volcanic group, Kamchatka, from ambient noise tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. № 3. P. e2019JB018900.

Gusev A.A., *Gordeev E.I.*, *Guseva E.M.*, *Petukhin A.G.*, *Chebrov V.N.* The first version of the Amax (M_w, R) relationship for Kamchatka // Pure and Applied Geophysics. 1997. V. 149. P. 299–312.

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. 2022. V. 12. № 10. P. 5010.

Johanson K.M., *Burgmann R.*, *Larson K.* Frictional properties on the San Andreas fault near Parkfield, California, inferred from models of afterslip following the 2004 earthquake // Bulletin of the Seismological Society of America. 2006. V. 96. № 4B.P. S321–S338.

Johnson J.M., *Satake K.* Asperity distribution of the 1952 great Kamchatka earthquake and its relation to future earthquake potential in Kamchatka. Seismogenic and tsunamigenic processes in shallow subduction zones. 1999. P. 541–553.

Kanamori H., *Thio H.K.*, *Dreger D.*, *Hauksson E.*, *Heaton T.* Initial investigation of the Landers, California, earthquake of 28 June 1992 using TERRAscope // Geophysical Research Letters. 1992. V. 19. № 22. P. 2267–2270.

Kelleher J., *McCann W.* Buoyant zones, great earthquakes, and unstable boundaries of subduction // Journal of Geophysical Research. 1976. V. 81. P. 4885–4896.

Kikuchi M., *Kanamori H.* Rupture process of the Kobe, Japan, earthquake of Jan. 17, 1995, determined from teleseismic body waves // Journal of Physics of the Earth. 1996. V. 44. № 5. P. 429–436.

Kocharyan G.G. Scale effect in seismotectonics // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. V. 5(2). P. 353–385.

https://doi.org/10.5800/GT2014520133

Koulakov I., *Shapiro N.M.*, *Sens-Schönfelder C.*, *Luehr B.G.*, *Gordeev E.I.*, *Jakovlev A.*, *Abkadyrov I.*, *Chebrov D.V.*, *Bushenkova N.*, *Droznina S.Y.*, *Senyukov S.L.*, *Novgorodova A.*, *Stupina T.* Mantle and crustal sources of magmatic activity of Klyuchevskoy and surrounding volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. № 10. P. e2020JB020097.

https://doi.org/10.1029/2020JB020097

Lay T., *Kanamori H.*, *Ruff L.* The asperity model and the nature of large subduction zone earthquakes // Earthquake Prediction Research. 1982. V. 1. P. 3–71

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.

Neo J.C., *Huang Y.*, *Yao D.*, *Wei S.* Is the aftershock zone area a good proxy for the mainshock rupture area? // Bulletin of the Seismological Society of America. 2021. V. 111. № 1. P. 424–438.

Ostapchuk A., *Polyatykin V.*, *Popov M.*, *Kocharyan G.* Seismogenic patches in a tectonic fault interface // Frontiers in Earth Science. 2022. V. 10. P. 904814.

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. 2010–1083-C, scale 1:5,000,000.

Ruff L., *Kanamori H.* Seismic coupling and uncoupling at subduction zones // Tectonophysics. 1983. V. 99. № 2–4. P. 99–117.

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.

Scholz C.H. The mechanics of earthquakes and faulting. Cambridge university press. 2019.

Skorkina A.A., *Gusev A.A.* Determination of corner frequencies of source spectra for subduction earthquakes in Avacha Gulf (Kamchatka) // Russian Geology and Geophysics. 2017. V. 58 (7). P. 844–854.

Senyukov S.L., *Droznin D.V.*, *Droznina S.Ya.*, *Shapiro N.M.*, *Nuzhdina I.N.* The KISS Network in 2015–2016: Catalogs and Comparison of Processing Results with Operational Estimates from Permanent Network // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2024. V. 60. № 2. P. 300–313.

Song T.A., *Simons M.* Large Trench-Parallel Gravity Variations Predict Seismogenic Behavior in Subduction Zones // Science. 2003. V. 301. P. 630–633

Soubestre J., *Seydoux L.*, *Shapiro N.M.*, *de Rosny J.*, *Droznin D.V.*, *Droznina S.Y.*, *Senyukov S.L.*, *Gordeev E.I.* Depth Migration of Seismovolcanic Tremor Sources Below the Klyuchevskoy Volcanic Group (Kamchatka) Determined from a Network-Based Analysis // Geophysical Research Letters. 2019. V. 46. № 14. P. 8018–8030.

Steblov G., *Kogan M.*, *King R.*, *Scholz C.*, *Burgmann R., Frolov D.* Imprint of the North American plate in Siberia revealed by GPS // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 24. P. 1924.

Syracuse E.M., *Abers G.A.* Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2006. V. 7. № 5. P. Q05017.

Tibaldi A. Recent Surface Faulting Investigated in Kamchatka Volcanic Arc // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2004. V. 85. № 14. P. 133–136.

Vallée M., *Douet V.* A new database of Source Time Functions (STFs) extracted from the SCARDEC method // Phys. Earth Planet. Int. 2016. № 257. P. 149–157.

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.

Vorobieva I., *Shebalin P.*, *Soloviev A.* Tracing asperities in Kamchatka area using break of slope in magnitude-frequency distribution // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2018. V. 20. P. 15860.

Yabe S., *Ide S.* Why do aftershocks occur within the rupture area of a large earthquake? // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. № 10. P. 4780–4787.

Ye L., *Kanamori H.*, *Lay T.,* Global variations of large megathrust earthquake rupture characteristics // Science Advances. 2018. V. 4 (3). P. eaao4915

Ward Jr J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American statistical association. 1963. V. 58. № 301. P. 236–244.

Wiemer S. Earthquake statistics and earthquake prediction research. Institute of Geophysics; Zürich, Switzerland. 2000.

Zaliapin I., *Ben-Zion Y.* Earthquake clusters in Southern California I: Identification and stability // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. V. 118 (6).

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.

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.

Peculiarities of Localization Zones of the Strongest Earthquakes in the Kuril-Kamchatka Arc

A. N. Besedina[a, b, *], E. V. Novikova[a], P. V. Beloklokov[b], V. P. Komzeleva[c, d], E. A. Kulik[b, e], E. A. Marshakova[f, g], I. I. Nugmanov[h], and K. Yu. Potapova[c, d]

[a]*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences*, *Moscow*, *Russia*
[b]*Moscow Institute of Physics and Technology*, *Dolgoprudny*, *Russia*
[c]*Novosibirsk State University*, *Novosibirsk*, *Russia*
[d]*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences*, *Novosibirsk*, *Russia*
[e]*Schmidt Institute of Physics of the Earth of Russian Academy of Sciences Moscow, Russia*
[f]*Lomonosov Moscow State University*, *Moscow*, *Russia*
[g]*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences*, *Petropavlovsk-Kamchatsky*, *Russia*
[h]*Innopolis University*, *Innopolis*, *Russia*
**e-mail*: *besedina.an@idg.ras.ru*

Received October 20, 2024; revised November 28, 2024; accepted December 25, 2024

Abstract — The processes occurring during the interaction of crustal blocks in the subduction zone are reflected both in the features of the seismic regime and in the distribution of the strongest earthquake sources in the study area. In this paper we analyze the peculiarities of localization zones of the strongest earthquakes of the Kuril-Kamchatka arc on the basis of data of two catalogs: regional catalog of Kamchatka branch of FRC GS RAS and global international catalog of USGS NIEC of US Geological Service for 1990–2024. Combination of catalogs based on a modified nearest neighbor method allowed us to remove duplicates — repeated earthquakes in initial catalogs — and to obtain a new unified catalog consisting of 52574 earthquakes. The nearest neighbor method was applied to identify two subsets: independent and connected earthquakes in space and time, which were further used to analyze the density of seismic events. The obtained regularities were compared with the focal characteristics of the strongest earthquakes of the subduction zone. The proposed approach allowed us to identify zones of localization of potential mega-earthquake sources along the Kuril-Kamchatka arc.

Keywords: Kuril-Kamchatka arc, subduction zone, earthquakes, nearest neighbor method, duplicates, contact patches, “asperity”, rupture zone