

УДК 550.34.06

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ ТИХОГО ОКЕАНА

© 2024 г. А. С. Агаян^{1,2, *}, А. К. Некрасова^{1, **}

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: nastaagaian@mail.ru

**E-mail: nastia@mitp.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 27.04.2024 г.

В статье представлены результаты анализа пространственной кластеризации эпицентров сейсмических событий на северо-западе Тихого океана, при использовании алгоритма топологической фильтрации (алгоритм DPS). Данные о мелкофокусных землетрясениях, зарегистрированных сейсмической сетью Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” в период с 1963 по 2022 гг., позволили выявить стабильные области группировки эпицентров. Эти области ассоциируются с Северным и Южным сегментами Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны и не зависят от времени регистрации землетрясений. Определено характерное значение радиуса кластеризации – 42–44 км для Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Анализ подтвердил уникальный характер сейсмического режима на территории Командорского участка Алеутской дуги, отличающийся от Северного и Южного сегментов.

Ключевые слова: алгоритм топологической фильтрации, пространственная кластеризация, алгоритм DPS, северо-запад Тихого океана, Курило-Камчатская сейсмофокальная зона.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724050014>, **EDN:** EKFNIG

ВВЕДЕНИЕ

Исследование группировки землетрясений в пространственно-временной области остается актуальной задачей как на глобальном, так и на региональном уровнях. Оно включает в себя не только выделение зависимых сейсмических событий для формирования каталога фоновых событий, используемого в вероятностных оценках сейсмической опасности и связанных с ними рисков, но и анализ динамики естественной группировки сейсмических событий как важной региональной характеристики сейсмического потока. Например, “взрыв афтершоков”, подтвержденный в исследованиях [Keilis-Borok et al., 1980; Akasheh, Kossobokov, 1989], долгие годы используется в прогнозе сильнейших землетрясений мира [Кособоков, Щепалина, 2020]. Другой тип группировки, сейсмический рой, продолжает вызывать дискуссии и требует отдельной интерпретации

в каждом конкретном случае. Недавнее значительное землетрясение $M_w = 7.5$ у западного берега о. Хонсю, Япония, вызвало повышенный интерес, в том числе, из-за необычного группирования сейсмических событий. В частности, землетрясение произошло в районе, активность которого усилилась за три года до роя сильных событий. Это, по-видимому, указывало на существенное изменение динамики сейсмического потока в месте землетрясения, произошедшего 01.01.2024 г. [Toda, Stein, 2024].

Северо-западная часть Тихого океана – одна из самых опасных территорий мира, где жители и инфраструктура подвергаются экстремальным природным угрозам из-за уникальной тектоники и геодинамики региона. Регион ограничен с юга Филиппинскими и Марианскими островами и на востоке побережьем Аляски. Он характеризуется сложной тектоникой, включая глубокую субдукцию и задуговые бассейны с горизонтальным растяжением. Движение восточной

части Евразии с северо-востока на восток в ответ на индо-азиатскую коллизию, начавшуюся около 50 млн лет назад, привело к формированию гигантской связанной системы задуговых бассейнов в северной части Тихого океана. Это движение противоречит традиционным тектоническим реконструкциям жестких плит, но согласуется с современными представлениями о нежесткости континентальной и океанической литосферы [Soloviev et al., 2022]. Пересечение Алеутской и Камчатской зон субдукции создает резкий перелом в северо-западной части Тихого океана, выделяющийся высоким уровнем сейсмической активности.

Вдоль Камчатской зоны субдукции возраст погружающейся океанической плиты постепенно уменьшается с юга на север (от 50 до 56° с.ш.) от 104.5 до 77 млн лет. Максимальная глубина землетрясений уменьшается от 500 до 100 км, а протяженность сейсмически активного участка в зоне субдукции меняется от 700 до 230 км. Угол погружения плиты на всем протяжении Камчатского участка Курило-Камчатской дуги остается постоянным и составляет около 55°. Севернее, до сочленения с Алеутской дугой, структура зоны субдукции изменяется: до широты 55° наблюдается постепенное уменьшение глубины гипоцентров землетрясений с 500 до 300 км, а севернее происходит резкое изменение с 300 до 100 км, и угол погружения плиты уменьшается до 35°. Вулканический фронт, почти линейный на широтах 50–55° с.ш., севернее смещается на северо-запад, и Тихоокеанская литосферная плита изгибается в этом же направлении, исчезая в зоне стыка с Алеутской дугой на широте около 56.5° [Гордеев и др., 2006].

Широтное изменение геометрии зоны субдукции региона отражается также в параметрах сейсмического потока. В Камчатском филиале Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ЕГС) принято деление сейсмичности территории на 10 отдельных зон. Анализ группировки эпицентров на территории трех из этих зон, а также на всей территории регистрации КФ ЕГС, рассмотрен в настоящей работе.

За шестидесятилетнюю историю регистрации КФ ЕГС каталог, очевидно, имеет неоднородную структуру, связанную с развитием параметров сейсмической сети. Например, резкое повышение числа землетрясений в каталоге КФ ЕГС с 1996 г. связано с внедрением системы цифровой регистрации. При этом каталог, вероятно, имеет стабильные во времени абсолютные ошибки в определении эпицентров камчатских

землетрясений – до 10 км, и до 15–20 км в определении глубин [Gorbatov et al., 1997; Гордеев и др., 2006].

Последовательный анализ изменений параметров пространственной кластеризации для эпицентров сейсмических событий за различные периоды регистрации региональной сейсмической сетью был выполнен алгоритмом топологической фильтрации DPS (*Discrete perfect set*) для территории Прибайкалья [Некрасова и др., 2024]. Особенности кластеризации эпицентров на территории Прибайкалья выявили общую изменчивость пространственного распределения сейсмических событий региона с 1964 по 2018 гг. Применение алгоритма DPS как инструмента для наблюдения за изменением пространственного распределения эпицентров в отдельных сейсмически активных регионах представляется интересной и информативной задачей исследования.

В пилотном исследовании [Агаян, Некрасова, 2023] анализ данных КФ ЕГС за период с 1963 по 2022 гг. с помощью алгоритма DPS выявил наиболее плотное распределение эпицентров как мелкофокусных, так и землетрясений, произошедших на промежуточных глубинах, связанное с территорией, объединяющей Курило-Камчатскую сейсмофокальную зону и западный участок Командорского сегмента Алеутской дуги. Анализ сейсмичности, ограниченной только Курило-Камчатской сейсмофокальной зоной показал, что топологическая фильтрация подтверждает деление, принятое в КФ ЕГС на Южный и Северный сегменты [Левина и др., 2013]. Настоящая работа посвящена проверке и детализации результатов пространственной группировки эпицентров, представленной в работе [Агаян, Некрасова, 2023], и их устойчивости для различных периодов регистрации.

ДАННЫЕ

В работе использованы данные каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов Камчатского филиала Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” (КФ ЕГС) <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue>, [Чеброва и др., 2020] с 1963 по 2022 гг.

Пространственная кластеризация эпицентров мелкофокусных (с глубиной $h \leq 70$ км) землетрясений рассмотрена как на всей территории регистрации КФ ЕГС, так и для отдельных зон сейсмичности Камчатского региона. Из десяти

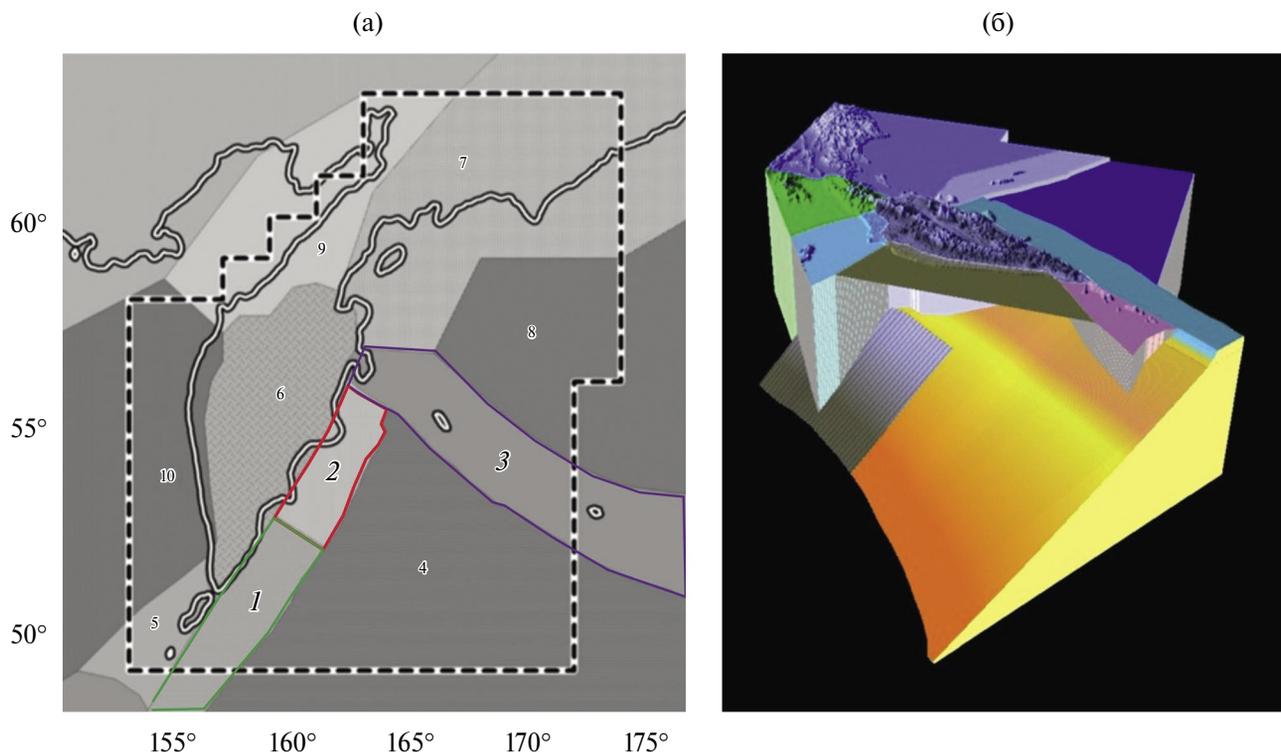


Рис. 1. Зоны сейсмичности Камчатского региона и его окрестностей: (а) [Левина и др., 2013] – поверхностное сечение (1 – сейсмофокальная зона Курил и Южной Камчатки; 2 – северная часть Камчатской сейсмофокальной зоны; 3 – Командорский сегмент Алеутской дуги). Пунктиром отмечена зона ответственности региональной сети; (б) – 3D.

тектоно-географических зон (структур), имеющих существенно различные характеристики сейсмичности [Левина и др., 2013], показанных на рис. 1а вместе с областью ответственной регистрации КФ ЕГС, анализ пространственной группировки выполнен для наиболее сейсмически активных зон: сейсмофокальной зоны Курил и Южной Камчатки (зона 1 на рис. 1а), северной части Камчатской сейсмофокальной зоны (зона 2) и Командорского сегмента Алеутской дуги (зона 3). Южный и Северный сегменты сейсмофокальной зоны анализировались алгоритмом как единая территория. На рис. 1б показано схематичное трехмерное распределение структур, принятых в КФ ЕГС.

Сейсмичность в пределах 10 зон рассмотрена для двух магнитудных диапазонов и временной границы 1996 г., выбранной из-за резкого увеличения числа землетрясений в каталоге КФ ЕГС с этого года после внедрения системы цифровой регистрации [Гордеев и др., 2006].

Пространственная кластеризация с использованием алгоритма DPS описана и проанализирована для эпицентров:

– землетрясений с магнитудой $M \geq 4.4$, зарегистрированных в зоне ответственности

региональной сети КФ ЕГС с 1963 по 2022 гг., и для трех непересекающихся временных интервалов – с 1963 по 1982, с 1983 по 2000 и с 2001 по 2022 гг. Временные границы внутри основного временного интервала выбирались так, чтобы число зарегистрированных землетрясений в эти периоды было примерно одинаковым;

– землетрясений с магнитудой $M \geq 3.5$, зарегистрированных в зоне ответственности региональной сети КФ ЕГС с 1996 по 2022 гг. и для трех непересекающихся временных интервалов с 1996 по 2003, с 2004 по 2014 и с 2015 по 2022 гг.;

– землетрясений с магнитудой $M \geq 3.5$, зарегистрированных на территории Камчатской сейсмофокальной зоны (Южный и Северный сегмент) с 1963 по 1983, с 1984 по 2000 и с 2001 по 2022 гг.;

– землетрясений с магнитудой $M \geq 3.5$, зарегистрированных в Командорском сегменте Алеутской дуги с 1996 по 2022 гг.

Пороговая магнитуда $M = 4.4$ соответствует энергетическому классу $K_p = 12$ и является заведомо представительной для всего периода регистрации КФ ЕГС. Пороговая магнитуда $M = 3.5$ соответствует энергетическому классу $K_p = 10$, что выше заявленного минимального

представительного класса для неглубоких землетрясений на территории регистрации Камчатской сейсмофокальной зоны $K_p = 9$ (см., например, работу [Левина и др., 2013]).

МЕТОД

Алгоритм DPS [Агаян и др., 2011; 2014; Gvishiani et al., 2013a] разработан для анализа способности объектов формировать пространственные кластеры. Этот процесс включает в себя определение областей, где плотность взаимного расположения объектов наиболее высока по сравнению с общей плотностью пространственного распределения на рассматриваемой территории.

Параметрами алгоритма DPS являются степень $-q$ и мера связанности объектов $-\beta$. При заданных параметрах q и β , пространственная кластеризация описывается через q -степенное среднее расстояний между объектами R_q и локальной плотностью кластеров α . Радиус R_q определяется в ходе работы алгоритма при заданном отрицательном значении степени q (см. уравнение (14), [Агаян и др., 2014]). Локальная плотность кластеров α однозначно определяется по заданному значению уровня связанности β из отрезка $[-1, 1]$ (см. уравнение (15), [Агаян и др., 2014]).

Алгоритм DPS применен последовательно к наборам эпицентров мелкофокусных землетрясений, описанным в разделе Данные. Для каждого подкаталога, оценка пространственной кластеризации выполнена при фиксированных значениях параметра $q = -2$ и четырех значениях параметра $\beta = \{-0.5, -0.25, 0, 0.25\}$. Значение $\beta = -0.5$ соответствует минимальной (для исследуемой выборки), а $\beta = 0.25$ – максимальной степени связанности эпицентров внутри выделенных кластеров.

Временная изменчивость кластеров эпицентров описана для параметров алгоритма DPS $q = -2$ $\beta = -0.5$. Значения R_q порядка 30–60 км, полученные при анализе кластеризации Камчатского региона при $q = -2$, соответствуют зоне очага землетрясений с радиусом $R(M) = 10^{c+dM}$ (при $c = -2.29$, $d = 0.57$, [Wells, Coppersmith, 1994]) для $M \approx 7.2-7.6$. Таким образом кластеры, выделенные алгоритмом DPS, заведомо не связаны с отдельными афтершоковыми сериями землетрясений с $M < 7$. Значение $\beta = -0.5$ позволяет рассматривать кластеры с относительно малыми значениями локальной плотности, что, в свою очередь, позволяет избежать “концентрации” алгоритма на отдельных афтершоковых сериях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 представлены результаты топологической фильтрации ($q = -2$, $\beta = -0.5$) для эпицентров землетрясений ($h \leq 70$), зарегистрированные КФ ЕГС с магнитудой $M \geq 4.4$, с 1963 по 2022 гг. (рис. 2а) и с магнитудой $M \geq 3.5$, зарегистрированных КФ ЕГС с 1996 по 2022 гг. (рис. 2б) [Агаян, Некрасова, 2023]. Границы двух сегментов Курило-Камчатской (К–К) сейсмофокальной зоны (Северный и Южный), а также Командорского сегмента Алеутской дуги показаны на рис. 2 цветными линиями.

Параметры топологической фильтрации для двух соответствующих подкаталогов представлены в табл. 1. Для характеристики сейсмичности в терминах топологической фильтрации в таблице приведены данные о числе выделенных кластеров $-N$; о проценте эпицентров, вошедших в выделенные кластеры (от общего числа эпицентров) $-n_{eq}$, %; минимальная локальная плотность эпицентров, объединенных в кластеры $-\alpha$; радиус кластеризации $-R_q$.

Радиус кластеризации R_q составляет 57.81 км для эпицентров землетрясений с магнитудой $M \geq 4.4$ и 59.35 км для эпицентров с магнитудой $M \geq 3.5$, соответственно. В один кластер (рис. 2а) вошло 79.0% (7884 событий) эпицентров землетрясений, зарегистрированных с 1963 по 2022 гг. Эпицентры событий с магнитудой $M \geq 3.5$, вошедшие в четыре кластера (рис. 2б), составили 80.0% (22049 событий) от эпицентров землетрясений, зарегистрированных с 1996 по 2022 гг. Из них 21 207 эпицентров относятся к единому кластеру, занимающему территорию, совпадающую с территорией кластера на рис. 2а. В этот кластер вошли эпицентры двух из пяти неглубоких сильнейших землетрясений, произошедших за анализируемый период. А именно, землетрясение 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ в северной части К–К сейсмофокальной зоны и землетрясение в Тихом океане 20.12.2018 г., $M_w = 7.3$. С эпицентрами еще трех сильнейших событий связаны три небольших кластера на рис. 2б. Это Олюторское землетрясение, произошедшее в апреле 2006 г. в Корякском нагорье $M_w = 7.6$, Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г., $M_w = 7.7$ и землетрясение, произошедшее в южной части К–К сейсмофокальной зоны 25.03.2020 г., $M_w = 7.5$. Эпицентры самих указанных землетрясений не вошли в кластеры, выделенные алгоритмом DPS. Значения моментной магнитуды M_w приведены по данным Геологической службы США (USGS).

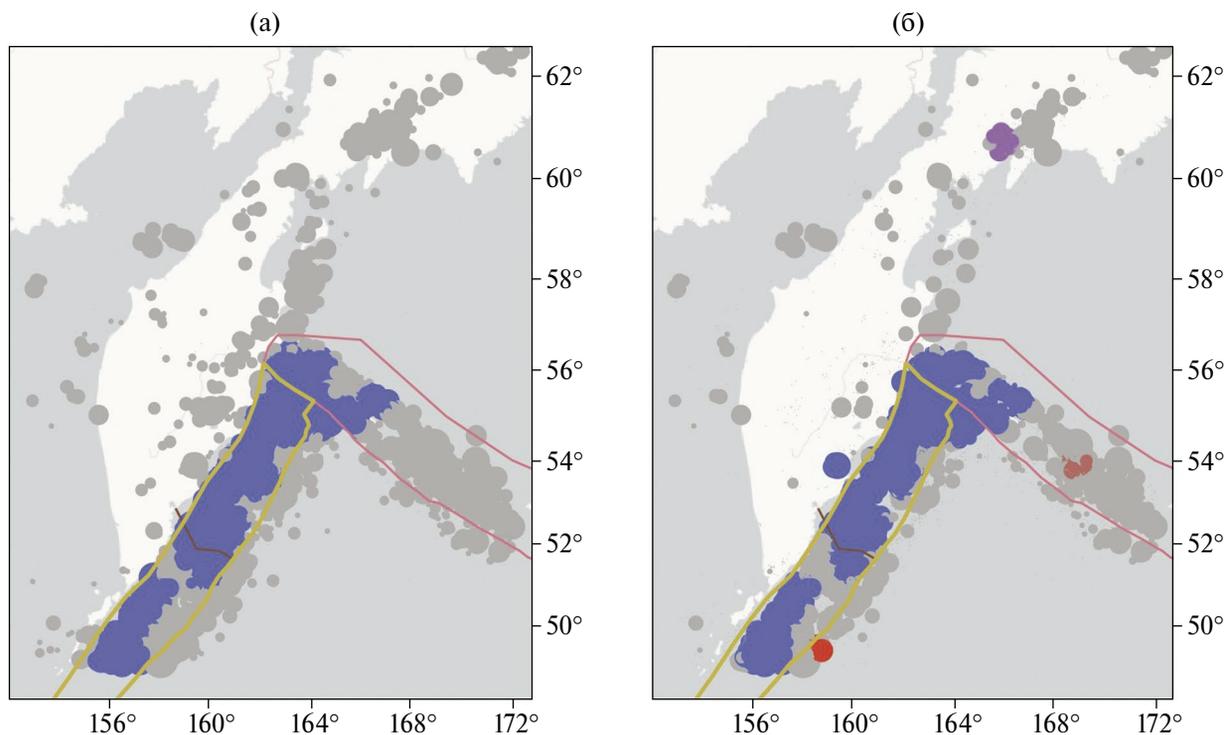


Рис. 2. Пространственное распределение эпицентров землетрясений, $h \leq 70$, объединенных в кластеры алгоритмом DPS ($q = -2$ и $\beta = -0.5$) (а) – для событий с магнитудой $M \geq 4.4$, зарегистрированных с 1963 по 2022 гг.; (б) – для событий с магнитудой $M \geq 3.5$, зарегистрированных с 1996 по 2022 гг.

Таблица 1. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории регистрации КФ ЕГС

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
q	β	N	n_{eq} , %	R_q , км	α
1963–2022 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 4.4$ (9981 событий)					
-2	-0.5	1	79.0% (7884)	57.81	31.60
	-0.25	3	59.5% (5934)		58.42
	0	1	26.7% (2661)		93.12
	0.25	1	4.0% (404)		140.05
1996–2022 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (27578 событий)					
-2	-0.5	4	80.0% (22049)	59.35	92.23
	-0.25	2	60.5% (16688)		165.58
	0	3	15.1% (4163)		260.01
	0.25	–	–		–

Результаты топологической фильтрации мелкофокусных землетрясений с $M \geq 4.4$, зарегистрированных КФ ЕГС за три временных интервала с 1963 по 2022 гг., представлены в табл. 2.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.4$ и глубиной $h \leq 70$ км, объединенных в кластеры алгоритмом DPS с параметрами $q = -2$ и $\beta = -0.5$ для трех последовательных временных интервалов, представлены на рис. 3. Значительные вариации образованных кластеров видны на рис. 3а, 3б и 3в в сочленениях зоны субдукции с Командорским участком Алеутской дуги. Так, для первого и третьего временных интервалов кластер северного участка К–К сейсмофокальной зоны охватывает значительную часть эпицентров в зоне Командорских островов, тогда как за временной интервал 1983–2000 гг. на этом участке сформировано три небольших кластера.

Разделение эпицентров на северный и южный участки прослеживается для всех трех подкаталогов, хотя граница, разделяющая кластеры, проходит южнее Авачинской бухты, по которой традиционно разделяют эти зоны. При анализе данных за полные временные интервалы с 1963 по 2022 гг. и с 1996 по 2022 гг., соответствующая граница наблюдается визуально (рис. 1). Однако алгоритм DPS объединяет события, произошедшие севернее и южнее этой границы, в один кластер.

Аналогично табл. 2, результаты топологической фильтрации эпицентров мелкофокусных землетрясений с $M \geq 3.5$, зарегистрированных КФ ЕГС за три временных интервала с 1996 по 2022 гг., представлены в табл. 3. Соответствующие пространственные распределения эпицентров для параметров алгоритма $q = -2$ и $\beta = -0.5$ показаны на рис. 4. Мы не

Таблица 2. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории регистрации КФ ЕГС, 1963–2022 гг., $M \geq 4.4$

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
q	β	N	$n_{eq}, \%$	$R_q, \text{ км}$	α
1963–1982 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 4.4$ (3110 событий)					
-2	-0.5	3	80.9% (2515)	50.71	9.61
	-0.25	3	62.9% (1955)		17.62
	0	5	30.3% (942)		28.20
	0.25	1	4.3% (135)		43.01
1983–2000 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 4.4$ (3304 событий)					
-2	-0.5	7	80.5% (2661)	48.21	10.22
	-0.25	5	59.8% (1974)		18.81
	0	3	30.18% (994)		30.24
	0.25	1	8.4% (278)		46.99
2001–2022 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 4.4$ (3567 событий)					
-2	-0.5	5	80.3% (2865)	53.11	10.77
	-0.25	7	62.6% (2232)		18.96
	0	5	23.7% (845)		29.73
	0.25	1	8.4% (300)		45.27

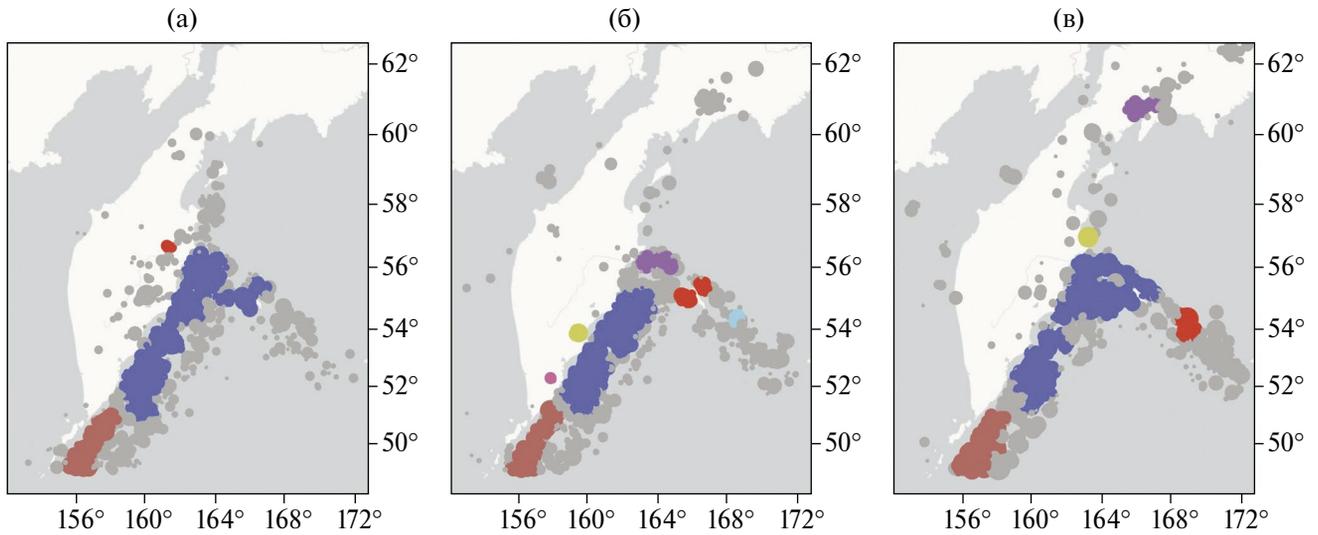


Рис. 3. Пространственное распределение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.4$ и $h \leq 70$, объединенных в кластеры алгоритмом DPS ($q = -2$ и $\beta = -0.5$), зарегистрированных: (а) – с 1963 по 1982 гг.; (б) – с 1983 по 2000 гг.; (в) – с 2001 по 2022 гг.

Таблица 3. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории регистрации КФ ЕГС, 1996–2022 гг., $M \geq 3.5$

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
q	β	N	$n_{eq}, \%$	$R_q, \text{ км}$	α
1996–2003 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (9379 событий)					
-2	-0.5	2	80.4% (7538)	43.95	25.88
	-0.25	3	56.3% (5284)		48.32
	0	4	31.2% (2913)		79.02
	0.25	2	11.4% (1120)		124.58
2004–2014 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (9319 событий)					
-2	-0.5	6	78.7% (7338)	54.20	27.64
	-0.25	6	58.4% (5445)		51.04
	0	4	28.2% (2624)		82.30
	0.25	1	5.2% (484)		126.97
2015–2022 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (8880 событий)					
-2	-0.5	7	79.2% (7033)	47.26	23.54
	-0.25	7	51.9% (4610)		42.80
	0	4	32.4% (2878)		69.58
	0.25	1	8.9% (790)		111.88

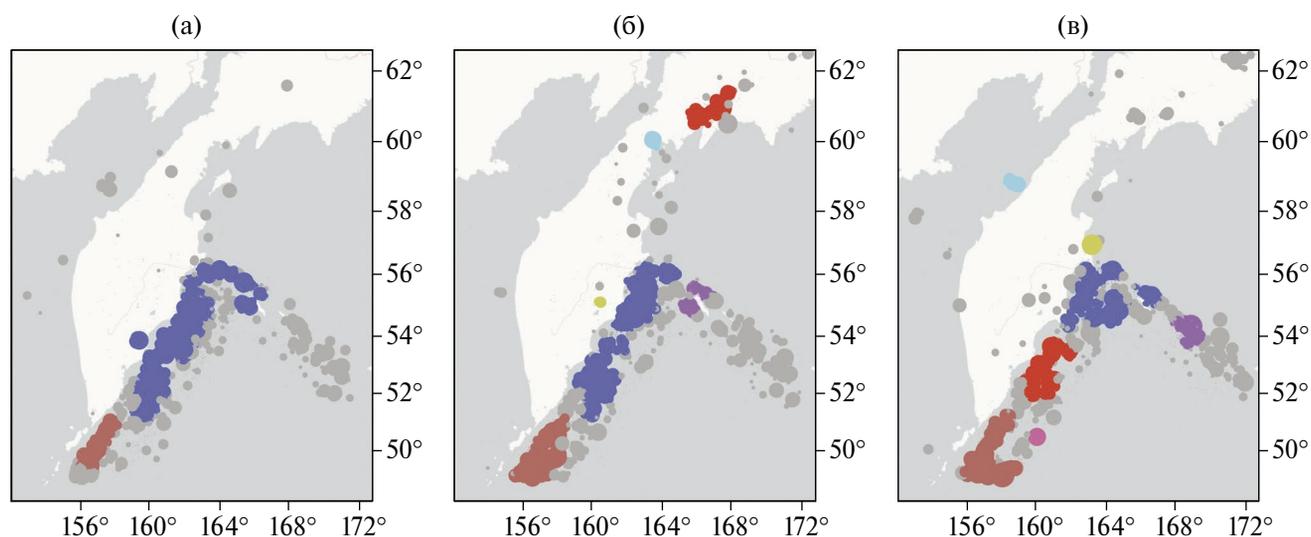


Рис. 4. Пространственное распределение эпицентров землетрясений, $M \geq 3.5$, $h \leq 70$, объединенных в кластеры алгоритмом DPS ($q = -2$ и $\beta = -0.5$), зарегистрированных: (а) – с 1996 по 2003 гг.; (б) – с 2004 по 2014 гг.; (в) – с 2015 по 2022 гг.

приводим карт выделенных кластеров для значений $\beta = \{-0.25, 0, 0.25\}$.

Из табл. 2 и табл. 3 видно, что увеличение значения параметра β и, соответственно, увеличение значения плотности α не приводит к значительному уменьшению числа кластеров (N), однако существенно уменьшаются площади, занятые эпицентрами, объединенными в кластеры. С ростом значения β количество событий, попавших в кластеры, значительно сокращается, а сами кластеры, по-видимому, отражают локальные сгущения эпицентров.

Аналогично анализу эпицентров землетрясений с $M \geq 4.4$ алгоритм DPS выделил крупные кластеры в северной и южной части К–К сейсмофокальной зоны для эпицентров с магнитудой $M \geq 3.5$ каждого из трех последовательных временных интервалов.

За периоды 1996–2003 гг. и 2004–2014 гг. алгоритм выявил основные зоны группируемости, которые соответствуют зонам, определенным для меньшего набора эпицентров с магнитудой $M \geq 4.4$. Это демонстрирует согласованность в определении территорий сейсмической активности для различных магнитудных диапазонов. Распад эпицентров Северного сегмента сейсмофокальной зоны на два кластера в период с 2015 по 2022 гг. (см. рис. 4в) может указывать на вероятное изменение сейсмического режима в этой области или на улучшение регистрационных возможностей сети КФ ФИЦ ЕГС РАН. Подкреплением утверждения о смене сейсмического режима может служить уменьшение

значений локальной плотности α для всех значений β (табл. 3) при изменении радиусов кластеризации R_q , которые составляют 43.95, 54.20 и 47.26 км для первого, второго и третьего временных интервалов соответственно.

Эпицентры Северного и Южного сегментов сейсмофокальной зоны были проанализированы алгоритмом DPS отдельно. Результаты представлены в табл. 4 и на рис. 5. По сравнению с анализом эпицентров из всего каталога за 1963–2022 гг. радиус кластеризации при тех же параметрах алгоритма DPS уменьшился, при этом значения R_q демонстрируют существенно меньший разброс для разных временных интервалов.

Пространственное распределение эпицентров, показанное на рис. 5а, 5б и 5в подтверждает устойчивые зоны кластеризации, полученные при анализе эпицентров по всей территории регистрации. В Южном сегменте К–К сейсмофокальной зоны кластер выделен для каждого из трех временных интервалов. В Северном сегменте один кластер выделен для интервалов 1962–1983 и 1984–2000 гг., а для интервала 2001–2022 гг. определяются два кластера наибольшей плотности.

Дополнительно мы рассмотрели пространственную кластеризацию эпицентров сейсмических событий для Командорского сегмента Алеутской дуги. Алгоритм DPS применен к координатам мелкофокусных землетрясений с $M \geq 3.5$, зарегистрированных с 1996 по 2022 гг. Результаты анализа, представленные в табл. 5 и на рис. 6,

Таблица 4. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для территории Камчатской сейсмофокальной зоны (Южный и Северный сегмент), 1996–2022 гг., $M \geq 3.5$

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
q	β	N	$n_{eq}, \%$	$R_q, \text{км}$	α
1963–1983 гг., глубина < 70 , $M \geq 3.5$ (12 027 событий)					
–2	–0.5	2	81.7% (9820)	41.45	49.32
	–0.25	4	53.2% (6393)		84.38
	0	2	18.6% (2241)		129.11
	0.25	1	4.7% (560)		191.76
1984–2000 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (12 130 событий)					
–2	–0.5	2	77.4% (9394)	40.95	52.29
	–0.25	3	49.9% (6047)		88.15
	0	1	22.4% (2722)		134.95
	0.25	–	–		–
2001–2022 гг., глубина ≤ 70 , $M \geq 3.5$ (12 557 событий)					
–2	–0.5	3	79.3% (9963)	42.62	56.69
	–0.25	3	48.1% (6045)		96.06
	0	2	19.2% (2408)		146.92
	0.25	–	–		–

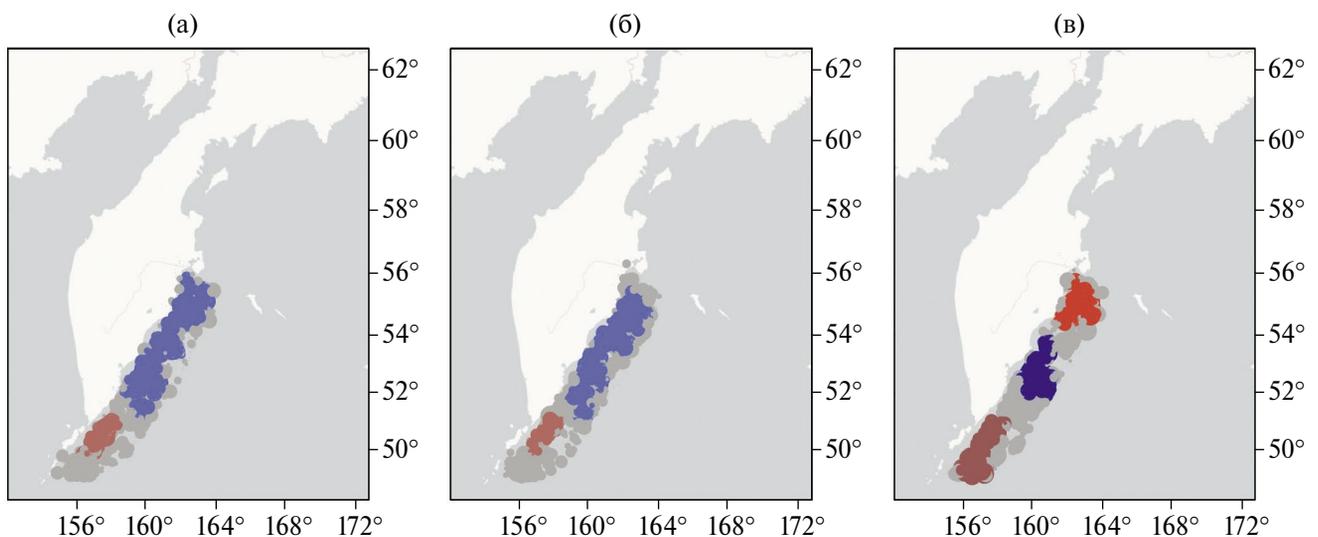


Рис. 5. Пространственное распределение эпицентров землетрясений $M \geq 3.5$, $h \leq 70$, зарегистрированных на территории К–К сейсмофокальной зоны: (а) – с 1963 по 1983 гг.; (б) – с 1984 по 2000 гг.; (в) – с 2001 по 2022 гг., объединенных в кластеры алгоритмом DPS ($q = -2$ и $\beta = -0.5$).

Таблица 5. Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий на территории Командорского сегмента Алеутской дуги, 1996–2022 гг., $M \geq 3.5$

Параметры алгоритма DPS		Характеристики кластеризации			
q	β	N	$n_{eq}, \%$	$R_q, \text{ км}$	α
1996–2022 гг., глубина < 70, $M \geq 3.5$ (4936 событий)					
-2	-0.5	2	79.0% (3898)	31.48	19.37
	-0.25	4	59.4% (2919)		35.77
	0	2	26.0% (1283)		58.35
	0.25	1	7.0% (345)		91.47

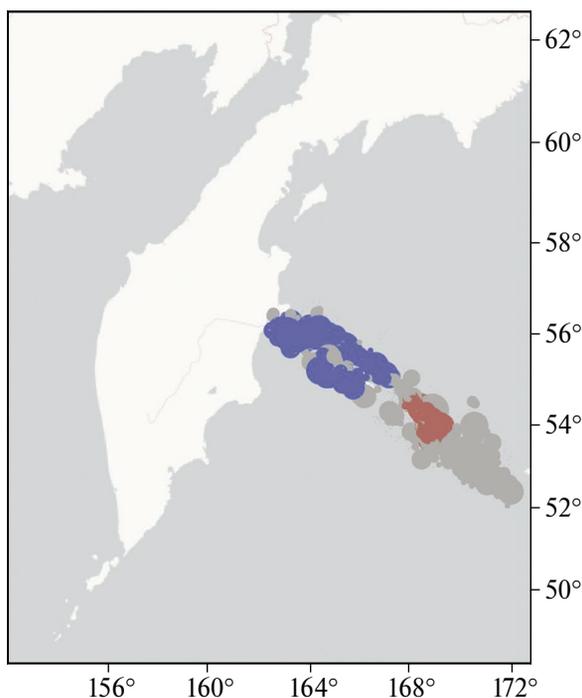


Рис. 6. Пространственное распределение эпицентров землетрясений $M \geq 3.5$, $h \leq 70$, зарегистрированных: с 1996 по 2022 гг. в зоне Командорского сегмента Алеутской дуги, объединенных в кластеры алгоритмом DPS ($q = -2$ и $\beta = -0.5$).

выполнены в пределах одного временного интервала. Вероятно, разделение эпицентров на западный и восточный кластеры (рис. 6) неслучайно. А именно, западный кластер на рис. 6 сформирован эпицентрами, которые при анализе всей территории были объединены в кластер с эпицентрами из сейсмофокальной зоны. Также следует отметить, что радиус кластеризации для Командорского участка Алеутской дуги значительно меньше (31–32 км) по сравнению

с радиусом кластеризации зоны субдукции при том же значении параметра q .

ДИСКУССИЯ

Анализ областей пространственной группировки эпицентров землетрясений, зарегистрированных КФ ЕГС, показал, что разделение на Северный и Южный сегменты сейсмофокальной зоны устойчиво выделяется алгоритмом DPS с параметрами, не накладывающими

жесткие требования к плотности группируемых объектов. По-видимому, при анализе пространственной кластеризации сейсмического потока на северо-западе Тихого океана оптимальным для использования алгоритма DPS является значение параметра $\beta = -0.5$ (при $q = -2$).

Ранее алгоритм DPS с параметрами $q = -2.5$ и $\beta = \{-0.2, -0.15\}$ был применен для оценки пространственной кластеризации мелкофокусных землетрясений КФ ЕГС [Дзедобоев и др., 2018]. Однако поставленная в работе [Дзедобоев и др., 2018] задача требовала однозначного определения областей максимальной плотности, в то время как наш анализ, посвящен способности эпицентров к формированию кластеров. В связи с этим противоречий между параметрами, выбранными в работе [Дзедобоев и др., 2018], и параметрами, использованными в нашем анализе, не наблюдается.

Изменение радиуса кластеризации для последовательных временных интервалов, представленное в табл. 2 и табл. 3, вероятно, связано с землетрясениями, зарегистрированными за пределами К–К сейсмофокальной зоны. Когда кластеры за пределами сейсмофокальной зоны отсутствуют (рис. 1а), значения R_q находятся в диапазоне 42–44 км, что соответствует значениям R_q , указанным в табл. 4. Эти значения можно рассматривать как характерные для областей кластеризации на территории Северного и Южного сегментов К–К сейсмофокальной зоны (анализ, направленный на выявление кластеров с максимальной плотностью, определит R_q порядка 32 км [Дзедобоев и др., 2018]).

Анализ алгоритмом топологической фильтрации для двух значений пороговой магнитуды, нескольких временных интервалов, анализ эпицентров на всей территории регистрации КФ ЕГС и на территории с максимальной интенсивностью сейсмического потока выявил устойчивые зоны пространственной группировки эпицентров. А именно, Северный и Южный сегменты сейсмофокальной зоны и Командорский участок Алеутской плиты.

Отметим, что согласно Общему закону подобия для землетрясений (ОЗПЗ) [Kossobokov, Mazhkenov, 1994; Nekrasova, Kossobokov, 2020], Южный и Северный сегменты К–К сейсмофокальной зоны и Командорский сегмент Алеутской дуги также демонстрируют значительное различие в параметрах сейсмичности. Непараметрический критерий Колмогорова–Смирнова λ_{K-S} [Kolmogorov, 1933; Smirnov, 1948] подтверждает различие в распределениях

коэффициентов ОЗПЗ, характеризующих пять зон на Северо-Западе Тихого океана (три мелкофокусные и две зоны промежуточной сейсмичности Южного и Северного сегментов К–К сейсмофокальной зоны), с достоверностью выше 99.9% ($\lambda_{K-S} > 1.95$). Исключение составляет промежуточная часть Южного сегмента с глубинами гипоцентров $70 < h \leq 350$ км, для которой нулевая гипотеза об одинаковом статистическом распределении параметров сейсмического потока не отвергается (достоверность теста около 49%) [Nekrasova, Kossobokov, 2023].

ВЫВОДЫ

В работе описаны результаты анализа пространственной кластеризации эпицентров мелкофокусных сейсмических событий на северо-западе Тихого океана. Использование алгоритма DPS для анализа данных, собранных Камчатским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба РАН” с 1963 по 2022 гг., выявило области стабильной группировки эпицентров как в пространстве, так и во времени. На основе полученных данных можно сделать несколько ключевых выводов:

- при анализе сейсмического потока на северо-западе Тихого океана оптимальным выбором параметров для алгоритма DPS оказалось значение $\beta = -0.5$ при $q = -2$. Этот вывод согласуется с результатами анализа региональной сейсмичности в Прибайкалье [Некрасова и др., 2024], что подчеркивает универсальность подхода при различных условиях анализа;

- основные зоны группировки, выявленные алгоритмом, совпадают для эпицентров событий с магнитудой $M \geq 3.5$ и для более ограниченного набора эпицентров с магнитудой $M \geq 4.4$, указывая на одинаковые территории сейсмической активности в обоих случаях;

- алгоритм DPS эффективно разделяет сейсмичность сейсмофокальной зоны на Северные и Южные сегменты, при этом разделение наблюдается для всех рассмотренных временных интервалов;

- распад эпицентров Северного сегмента на два кластера, начиная с 2000-х годов, может свидетельствовать об изменении сейсмического режима в этом сегменте;

- результаты кластеризации мелкофокусных землетрясений в Командорском участке Алеутской дуги подтверждают уникальный режим пространственной группировки эпицентров,

отличающийся от режимов Северного и Южного сегментов сейсмофокальной зоны.

Эти выводы вносят важный вклад в понимание пространственной структуры сейсмичности региона северо-запада Тихого океана и могут быть полезны для дальнейших исследований сейсмической активности территории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Авторы признательны автору кода алгоритма DPS Ш.Р. Богоутдинову за программное обеспечение представленного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаян А.С., Некрасова А.К. Анализ пространственной кластеризации сейсмических событий алгоритмом топологической фильтрации DPS: Камчатка. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений. Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти чл.-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук. Александра Анатольевича Соловьева. М.: ИТПЗ РАН. 2023. С. 14–19.
- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н. Дискретные совершенные множества и их применение в кластерном анализе // Кибернетика и системный анализ. 2014. Т. 50. № 2. С. 17–32.
- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Добровольский М.Н. Об одном алгоритме поиска плотных областей и его геофизических приложениях. Доклады 15-й Всероссийской конференции “Математические методы распознавания образов. ММРО-15”. 2011. С. 543–546.
- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6–27.
- Дзобоев Б.А., Агаян С.М., Жарких Ю.И., Красноперов Р.И., Барыкина Ю.В. Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли. 2018. № 2. С. 96–103. <https://doi.org/10.7868/S0002333718020084>
- Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. 2020. № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.31857/S0002333720010068>
- Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010057>
- Некрасова А.К., Кособоков В.Г. Общий закон подобия для землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2020. № 6. С. 3–25. <https://doi.org/10.31857/S0203030620060152>
- Некрасова А.К., Агаян А.С., Кособоков В.Г. Анализ пространственной кластеризации сейсмических событий алгоритмом топологической фильтрации DPS: Прибайкалье // Физика Земли. 2024. № 2. С. 26–41. <https://doi.org/10.31857/S0002333724020034>
- Чеброва А.Ю., Чемарёв 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. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>
- Akashah B., Kossobokov V.G. Premonitory clustering before strong earthquakes in Iran-Afghan region // Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata. 1989. XXXI. № 122. P. 159–162.
- Gorbatov A., Kostoglodov V., Suarez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka subduction zone // Journal of Geophysical Research. 1997. V. 102. P. 17883–17898 <https://doi.org/10.1029/96JB03491>
- Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B. Fuzzy based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. 2013a. V. 12. № 1. P. 1–10.
- Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Rotwain I.M. Bursts of aftershocks, long-term precursors of strong earthquakes // Nature. 1980. V. 283. P. 259–263.
- Kolmogorov A. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // Giornale dell’Istituto Italiano degli Attuari. 1933. V. 4. P. 83–91.
- Kossobokov V.G., Mazhkenov S.A. On similarity in the spatial distribution of seismicity / In: Chowdhury D.K. (ed.). Computational seismology and geodynamics. AGU, The Union, Washington DC. 1994. V 1. P. 6–15.
- Nekrasova A., Kossobokov V. The observed variability of seismic dynamics in the Pacific Northwest. XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). 2023. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-0382>
- Smirnov N. Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions. // Ann. Math. Stat. 1948. V. 19. P. 279–281. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730256>
- Soloviev A.A., Kossobokov V.G., Eichelberger J.C. Geophysical Studies of Geodynamics and Natural Hazards in the Northwestern Pacific Region: Introduction // Pure Appl. Geophys. 2022. V. 179. P. 3895–3902. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03192-9>
- Toda S., Stein Ross S. Intense seismic swarm punctuated by a magnitude 7.5 Japan shock. Temblor. 2024. <http://doi.org/10.32858/temblor.333>
- Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Am. 1994. V. 84. P. 974–1002.

Analysis of Spatial Clustering of Seismic Events in the Northwest Pacific Ocean

A. S. Aгаian^{a,b,*} and A. K. Nekrasova^{a,**}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

^b*Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: nastaagaian@mail.ru*

^{**}*e-mail: nastia@mitp.ru*

Received February 12, 2024

revised March 5, 2024

accepted April 27, 2024

Abstract – The spatial clustering of epicenters of seismic events in the Northwest Pacific Ocean is analyzed using the Discrete Perfect Sets (DPS) topological filtering algorithm. The results of the analysis are presented in this paper. Based on the data shallow earthquakes recorded from 1963 to 2022 by the seismic network of the Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, stable areas of epicenter clustering are identified. These areas are associated with the Northern and Southern segments of the Kuril-Kamchatka seismofocal zone and do not depend on the time of recording of the earthquakes. The characteristic clustering radius for the Kuril-Kamchatka seismofocal zone is determined and is found to be 42–44 km. The analysis has confirmed the unique pattern of seismicity in the territory of the Commander segment of the Aleutian arc, which differs from that observed in the Northern and Southern segments.

Keywords: topological filtering algorithm, spatial clustering, DPS algorithm, Northwest Pacific, Kuril-Kamchatka seismofocal zone