УДК 550.34.06

# АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ АЛГОРИТМОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ DPS: ПРИБАЙКАЛЬЕ

© 2024 г. А. К. Некрасова<sup>1,2, \*</sup>, А. С. Агаян<sup>1,3, \*\*</sup>, В. Г. Кособоков<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия <sup>2</sup>Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия <sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

\*E-mail: nastia@mitp.ru \*\*E-mail: nastaagaian@mail.ru \*\*\*E-mail: volodya@mitp.ru Поступила в редакцию 14.03.2023 г. После доработки 05.09.2023 г. Принята к публикации 10.09.2023 г.

В работе представлены результаты применения алгоритма топологической фильтрации (алгоритм DPS) для анализа пространственной кластеризации эпицентров сейсмических событий на территории Прибайкалья. Использованы данные о землетрясениях, зарегистрированных сейсмической сетью Байкальского филиала Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" в пределах 48–58° с.ш. и 99–122° в.д. за период с 1964 по 2018 гг. Получены характеристики кластеризации для:

— периода регистрации с 1989 по 2018 гг. при различных параметрах алгоритма DPS и четырех уровнях минимального энергетического класса  $K_p$  сейсмических событий,

— шести непересекающихся временных интервалов с 1964 по 2018 гг. и сейсмических событий энергетического класса  $K_P \ge 8.6$  при фиксированных параметрах алгоритма DPS.

Динамика параметров кластеризации с 1964 по 2018 гг., возможно, характеризует изменчивость сейсмического режима региона, а именно: уменьшение линейного размера областей выделенных групп эпицентров от порядка тысячи километров до десятков километров может свидетельствовать о принципиальном изменении сейсмического режима на территории Прибайкалья в конце 90-х – начале 2000-х годов по сравнению с периодом 1964–1997 гг.

*Ключевые слова*: дискретный математический анализ, алгоритм топологической фильтрации, кластеризация, Байкальская рифтовая зона.

DOI: https://doi.org/10.31857/S0002333724020034, EDN: BTPWGD

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Группируемость землетрясений в пространстве и времени (фор- и афтершоковые последовательности, рои, кластеры) является одним из возможных проявлений сложной динамики Земли. Систематическая идентификация кластеров сейсмических событий призвана выделить возможные закономерности и особенности регионального сейсмического потока. Описанные кластеры вместе с разнообразными данными физических полей региона, например, спутниковыми наблюдениями Глобальной системы позиционирования (GPS), картами тепловых потоков, топографией и др., могут дать новые знания для решения задач оценки сейсмической опасности.

Одним из наиболее распространенных методов классификации кластеров является непараметрический метод k-ближайших соседей [Silverman, 1986]. Метод применяется при отсутствии заранее определенной области оценки: точка наблюдения связана с набором нерегулярно расположенных точек данных по заданному, желательно естественному критерию близости. Одним из недавних успешных применений метода k-ближайших соседей к оценке

сейсмической опасности является оценка интенсивности двумерного поля сейсмических событий [Pisarenko, Pisarenko, 2022].

Другой подход к объективной кластеризации сейсмических событий – распознавание мест возможных землетрясений PREPA (Pattern Recognition Earthquake-Prone Area) (см. работы [Гвишиани и др., 1988; 2017а; 2020; Gorshkov et al., 2003; Соловьев и др., 2014; Горшков и др., 2018]). PREPA направлен на выявление районов, подверженных наиболее сильным землетрясениям, алгоритмами на основе дискретного математического анализа (Discrete Mathematical Analysis, DMA) [Gvishiani et al., 2013]. Обзор результатов распознавания PREPA и применения методов DMA для определения сейсмоопасных областей во многих регионах мира представлен в работе [Кособоков, Соловьев, 2018].

Серия алгоритмов для анализа дискретных данных DMA, объединена общей формальной основой, которая представляет собой нечеткие модели дискретных аналогов фундаментальных понятий классического математического анализа: пределы, непрерывность, гладкость, связность, монотонность, экстремум и др. Использование DMA для определения сейсмоопасных районов предполагает применение математических и вычислительных методов для объективной обработки и анализа сейсмических и геологических данных.

В основе алгоритмов DMA, предназначенных для анализа группируемости объектов, лежит выделение кластеров дискретных наблюдений по заданному признаку (классификация дискретных наблюдений на принадлежность к одному из кластеров) [Gordon, 1981]. Так, например, разрабатываемые в Геофизическом центре РАН алгоритмы DMA скреплены единой формальной основой, базирующейся на нечеткой логике и искусственном интеллекте, и направлены, в частности, на решение задач упорядочивания слоев геопространственных данных в однородные группы, фильтрацию данных и выделение плотных однородных сгущений [Agavan et al., 2020]. Алгоритмы DPS-кластеризации эффективно используются в различных геологических и геофизических исследованиях. Например, для пространственного анализа каталогов землетрясений, выделения сигналов на геофизических записях или при оценке геологической неустойчивости территории захоронения радиоактивных отходов [Agayan et al., 2023]. Анализ сейсмического потока с помощью алгоритма DPS лежит в основе одного из методов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Гвишиани и др., 2013; Дзебоев и др., 2018].

Оценка сейсмической опасности и определение зон возможного возникновения сильных землетрясений на территории Прибайкалья представляет собой важнейшую задачу. Наличие в пределах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) объектов хозяйственно-бытовой инфраструктуры требует регулярного уточнения сейсмической опасности региона, а также предполагает проведение мониторинга сейсмического процесса для предотвращения катастрофических последствий от сильных землетрясений [Государственный..., 2018]. В рамках DMA с аналитическим ядром DPS-кластеризации задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на территории Прибайкалья подробно описана в работе [Гвишиани и др., 2017б].

Нами представлены результаты применения алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа пространственной кластеризации эпицентров землетрясений на территории Прибайкалья. Описаны характеристики кластеризации для периода 1989-2018 гг. сейсмических событий, зарегистрированных Байкальским филиалом Федерального исследовательского центра "Единая геофизическая служба РАН" (БФ ФИЦ ЕГС РАН), при различных параметрах алгоритма и четырех уровнях минимального энергетического класса сейсмических событий К<sub>n</sub>. Также описаны характеристики кластеризации для шести непересекающихся периодов регистрации с 1964 по 2018 гг. при фиксированных параметрах алгоритма и одном минимальном значении  $K_p$ .

## ДАННЫЕ

В работе использованы данные БФ ЕГС РАН<sup>1</sup> в пределах 48–58° с.ш. и 99–122° в.д. за периоды 1989–2018, 1964–1982, 1986–2005 и 2006– 2018 гг. Каталог полон для событий энергетического класса  $K_p = 8.6$  и выше, что соответствует магнитудам больше либо равным 2.56, согласно принятого в БФ ЕГС РАН пересчета значения энергетического класса в магнитуду по формуле Т.Г. Раутиан ( $K_p = 4 + 1.8 \times M$ ).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Baikal Division of the Geophysical Survey, Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Homepage, http://www.seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1



**Рис. 1.** Число землетрясений с энергетическим классом  $K_p \ge 8.6$  за полугодовые временные интервалы. Данные с 01.01.1960 по 31.12.2021 гг. в пределах 48–58° с.ш. и 99–122° в.д. (дата обращения 12.12.2022).

На рис. 1 приведена гистограмма числа событий с энергетическим классом *К*<sub>P</sub> ≥ 8.6 для энергетических диапазонов с шагом  $\Delta K_P = 0.6$  за полугодовые временные интервалы с 01.01.1960 по 31.12.2021 гг. (БФ ЕГС РАН не публикует данные о глубинах зарегистрированных событий, т.к. в пределах регистрации вся сейсмичность характеризуется как коровая.) На рис. 1 видна недостаточная представительность событий с классом менее 9.2 за 2019-2021 гг. (зарегистрированные в этот период сейсмические события находится в обработке). Данные с января 2019 г. нами не использовались. Отметим, что в период до 1986 г. включительно значения энергетического класса сейсмической сетью БФ ЕГС РАН определялись исключительно целыми числами, а с 1987 г. по настоящее время – с точностью до десятых. Изменение в точности определения классов четко видно на рис. 1.

Для временного интервала 1989-2018 гг. и непересекающихся временных интервалов 1964— 1982, 1986-2005 и 2006-2018 гг. построены графики Гутенберга-Рихтера (рис. 2). Как видно из рисунка, значение класса  $K_p = 8.6$  является представительным для каждого из выбранных временных интервалов. Число станций БФ ЕГС РАН и их расположение за весь рассмотренный период регистрации существенно не менялось. Параметры сейсмической сети приводятся как на сайте службы (https://seis-bykl.ru/modules. php?name=Network&ne=1), так и в ежегодных выпусках "Землетрясения в СССР" до 1992 г. и "Землетрясения Северной Евразии" с 1992 г. по н.в. Отметим, что ежегодное число сейсмических событий, зарегистрированных в пределах рассматриваемой территории и выбранных

временных интервалов, непостоянно. Интервалы продолжительностью 19 лет с января 1964 г. и с июля 1986 г. и интервал продолжительностью 13 лет с января 2006 г. имеют примерно одинаковое число зарегистрированных землетрясений, а именно: 4849, 4766 и 4812 соответственно. Для анализа динамики кластеризации были выбраны временные диапазоны с примерно одинаковым числом зарегистрированных событий. За интервал в 30 лет с января 1989 г. зарегистрировано 9477 землетрясений с  $K_p = 8.6$  и выше.

При анализе результатов кластеризации, каждый из трех временных интервалов – 1964–1982, 1986–2005 и 2006–2018 гг. был разбит на два, с примерно равным числом зарегистрированных землетрясений.

#### МЕТОД

Алгоритм DPS анализирует группируемость объектов в пространстве, выделяя в кластеры объекты, взаимное пространственное распределение которых определяется как наиболее плотное на фоне плотности пространственного распределения всех объектов на рассматриваемой территории. Подробное описание алгоритма DPS приведено в работах [Агаян и др., 2011; 2014].

Алгоритм DPS анализирует пространственное распределение объектов в двумерном пространстве, рассматривая только взаимное пространственное положение эпицентров. Распределение землетрясений по времени и энергетическая величина сейсмических событий не учитывается.

Параметрами алгоритма DPS являются: степень q и уровень связанности кластеризованных



**Рис. 2.** Графики Гутенберга–Рихтера для четырех временных интервалов. Примечание: на оси абсцисс представлено значение энергетического класса *К*<sub>*p*</sub>, на оси ординат – кумулятивное число землетрясений.

событий  $\beta$ . Группы объектов, объединенные в кластеры при фиксированных параметрах qи  $\beta$ , характеризуются q-степенным средним всех расстояний из рассматриваемого массива объектов ( $R_q$ ) и локальной плотностью кластеров  $\alpha$ . Радиус  $R_q$  определяется в ходе работы алгоритма при заданном отрицательном значении степени q (см. уравнение (14) из работы [Агаян и др., 2014]). Локальная плотность кластеров  $\alpha$ однозначно определяется по заданному значению уровня связанности  $\beta$  из отрезка [-1, 1] (см. уравнение (15) из работы [Агаян и др., 2014]).

Анализ пространственной группируемости эпицентров сейсмических событий выполнен для территории Прибайкалья с 1989 по 2018 гг. при фиксированном q = -2. Значение q определено на этапе предварительного исследования [Агаян, Некрасова, 2021]. А именно, было показано, что все основные толчки при значениях q = -2 и  $\beta = -0.5$  на территории БРЗ объединены алгоритмом DPS в единый кластер. Значение q = -2, по-видимому, обеспечивает максимальный радиус кластеризации в регионе для сравнительного пространственного анализа.

Для анализа кластеризации за временной интервал 1989-2018 гг. использованы четыре

значения уровня связанности  $\beta$  {-0.5, -0.25, 0, 0.25}. Значение  $\beta$  = -0.5 соответствует минимальной, а  $\beta$  = 0.25 – максимальной степени связанности эпицентров внутри выделенных кластеров.

В работе [Гвишиани и др., 20176] для DPS-анализа территории, включающей Прибайкалье и Забайкалье в пределах 95–123° с.ш., использованы параметры q = -2.25,  $\beta = \{0, 0.1, -0.1\}$ . Отметим, что исследование [Гвишиани и др., 20176] ставило целью последовательного выявления мест возможного возникновения эпицентров землетрясений с магнитудами выше заданных. Мы использовали значительно более широкий диапазон значений  $\beta$ , ставя задачу описания кластеризации при различных уровнях связанности. Максимальные и минимальные возможные значения параметра  $\beta$  нами не рассматривались как неинформативные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

#### Характеристики кластеризации 1989-2018 гг.

Рассмотрены четыре набора эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных БФ ЕГС РАН с 1989 по 2018 гг., с увеличивающимся пороговым значением энергетического класса анализируемых землетрясений:  $K_p = 8.6, 9.2,$ 9.8, 10.4. Для каждого набора эпицентров кластеры выделены при фиксированных значениях q = -2 и  $\beta = \{-0.5, -0.25, 0, 0.25\}$ . Результаты кластеризации, а именно – число выделенных кластеров (*N*); процент эпицентров, вошедших в выделенные кластеры, от общего числа эпицентров при заданном пороге  $K_p(n_{eq}, \%)$ ; минимальная локальная плотность эпицентров, объединенных в кластеры ( $\alpha$ ); радиус кластеризации ( $R_q$ ) представлены в табл. 1.

Для четырех наборов эпицентров сейсмических событий, определяемых возрастающими значениями  $K_p$ , разброс значений  $R_q$  не превосходит 5 км. Это говорит о достаточно стабильном радиусе кластеризации при значительном изменении числа анализируемых эпицентров, а именно:  $R_q = 23.1$  (9477 эпицентров,  $K_p \ge 8.6$ ),  $R_q = 21.7$  (4833 эпицентров,  $K_p \ge 9.2$ );  $R_q = 20.6$ (2462 эпицентров,  $K_p \ge 9.8$ ) и  $R_q = 18.2$  (1290 эпицентров,  $K_p \ge 10.4$ ).

Как и следовало ожидать, наибольшее число кластеров выделено при наименьшем заданном уровне связанности  $\beta = -0.5$ . При этом, в кластеры вошло максимальное число эпицентров из каждого рассматриваемого набора землетрясений, а именно: 73.9, 72, 67.3 и 56.1% эпицентров всех рассмотренных событий объединены в 17, 14, 15 и 12 кластеров для  $K_P \ge 8.6$ , 9.2, 9.8 и 10.4 соответственно.

кластеров, объединивших наименьший процент от обшего числа эпицентров, наблюдается при наибольшем использованном значении уровня связанности  $\beta = 0.25$ , а именно: 29.3% группируемых эпицентров и 4 кластера; 30.3% эпицентров и 4 кластера; 30.4% и 3 кластера; 29.5% и 3 кластера для  $K_P \ge 8.6, 9.2, 9.8$  и 10.4 соответственно. Отметим, что при увеличении значения уровня связанности β уменьшается зависимость доли объединенных в кластеры эпицентров от общего числа событий в выборке или, иными словами, от порогового значения К<sub>р</sub>. При значении  $\beta = 0.25$  примерно 30% эпицентров из 9477, 4833, 2462 и 1290 сгруппированы алгоритмом DPS в 4, 4, 3 и 3 кластера соответственно. Разброс значений  $n_{eq}$ , составляет 1.1%, в то время как при  $\beta = -0.5$  разброс  $n_{eq}$  составляет 17.8% для тех же наборов эпицентров.

Локальная плотность  $\alpha$  при увеличении значения связанности  $\beta$  — растет. При минимальном  $\beta = -0.5$  и максимальном  $\beta = 0.25$  величина  $\alpha$  изменяется примерно в 10 раз. От 7.4 до 69.5, от 4.4 до 40.3, от 2.9 до 24.7 и от 2.1 до 18.4 для эпицентров с  $K_p \ge 8.6$ , 9.2, 9.8 и 10.4 соответственно.

Графики на рис. З показывают зависимость процента группируемых событий  $n_{eq}$  от выбранного значения  $\beta$  (рис. 3а) и от значений минимальной локальной плотности  $\alpha$  (рис. 3б). Зависимость  $n_{eq}$  от  $\alpha$  хорошо аппроксимируется



**Рис. 3.** Характеристики кластеров эпицентров сейсмических событий (1989—2018 гг.),  $K_p \ge 8.6, \ge 9.2, \ge 9.8$  и  $\ge 10.4$ , q = -2: (а) – значения  $\beta$  (абсцисса),  $n_{eq}$  – процент событий, вошедших в кластеры (ордината); (б) – значения локальной плотности  $\alpha$  (абсцисса),  $n_{eq}$  (ордината).

степенной функцией. Для кластеров, выделенных по максимальному набору эпицентров ( $K_p \ge 8.6$ ), это приближение наилучшее ( $R^2 = 99.9\%$ ). Можно предположить, что сформированные алгоритмом группы эпицентров являются частью самоподобной иерархической структуры пространственного распределения эпицентров сейсмических событий рассматриваемого региона.

На рис. 4-рис. 7 показаны результаты работы алгоритма DPS, примененного к эпицентрам землетрясений, зарегистрированных с 1989 по 2018 гг., при q = -2 и четырех значениях уровня связанности  $\beta$ : -0.5 (рис. 4), -0.25 (рис. 5), 0 (рис. 6), 0.25 (рис. 7). На каждом рисунке слева направо представлено пространственное распределение эпицентров сейсмических событий для четырех пороговых значений K<sub>p</sub>. Характеристики кластеров, представленных на рис. 4рис. 7, приведены в описанной выше табл. 1. Анализируя данные рисунки, можно предположить, что изменение порогового значения  $K_{p}$ влияет на формирование кластеров не существенно. Общая структура группируемости почти на всей территории Прибайкалья сохраняется при изменении К<sub>Р</sub> при фиксированном значении β, что соответствует представлению о самоподобии распределения эпицентров сейсмических событий на территории региона.

Как видно из рис. 4—рис. 7, наименьшее значение уровня связанности ( $\beta = -0.5$ ) обеспечивает максимальную площадь выделяемых алгоритмом DPS кластеров эпицентров исследуемого каталога и, возможно, обеспечивает наименьшую зависимость результатов работы алгоритма от присутствия в обрабатываемой выборке афтершоковых событий.

Чтобы описать изменения отдельных кластеров при различных значениях  $\beta$  рассмотрим землетрясения класса  $K_p = 14$  и выше, попавшие и не попавшие в кластеры. Изменения в пределах одного кластера описаны в терминах уменьшения числа событий в отдельном кластере, уменьшении занимаемой им области пространства или исчезновении кластера.

За рассматриваемый временной интервал (1989–2018 гг.) БФ ЕГС РАН было зафиксировано 21 землетрясение с энергетическим классом  $K_p \ge 14$ . Эпицентры этих событий отмечены символами "звездочка" на рис. 4–рис. 7. В табл. 2 представлен список землетрясений с энергетическим классом  $K_p \ge 14$ . Указана принадлежность эпицентров этих землетрясений кластерам при различных значениях параметра  $\beta$  и пороговых значениях  $K_p$  рассмотренной

выборки. События в табл. 2 сгруппированы по принадлежности к одному кластеру. Номер кластера, которому принадлежит эпицентр землетрясения, указан в ячейке. Нулевое значение в ячейке табл. 2 соответствует расположению эпицентра землетрясения за пределами определенных алгоритмом DPS кластеров.

Из 21-го землетрясения с  $K_P \ge 14$  в период 1989—2018 гг. только эпицентры трех событий не вошли ни в один из кластеров. В восточной части БРЗ это:

– эпицентр землетрясения 25.10.1989 г., расположенный в северо-восточной части Кодарского разлома, где современная сейсмическая активность минимальна [Баскаков и др., 1993];

 – эпицентр Таллайского землетрясения 02.09.2015 г., расположенный в казавшемся ранее асейсмичным районе Северо-Муйского хребта [Мельникова и др., 2021].

Оба события относятся к Муйско-Чарскому сектору, в пределах которого произошло одно из сильнейших за последнее столетие в Восточной Сибири Муйское землетрясение 27.06.1957 г., M = 7.6 [Новый каталог..., 1977]. В юго-западной части БРЗ не вошел в кластеры эпицентр землетрясения 29.06.1995 г., произошедшего в районе Тункинских впадин.

При  $\beta = -0.5$  для эпицентров землетрясений с  $K_p = 8.6$  и выше выделено 17 кластеров (рис. 4), которые характеризуются параметрами  $R_q = 23.1$  км и  $\alpha = 7.4$ . 18 эпицентров событий с  $K_p \ge 14$  вошли в семь из этих кластеров. Два из трех крупнейших кластеров, определенных алгоритмом DPS, расположены на северо-востоке БРЗ. Это кластер из 2277 эпицентров, который можно ассоциировать с Кичерскими землетрясениями 21.03.1999 г., и кластер из 1565 эпицентров, сформированный в районе Муяканской последовательности землетрясений, которые произошли в Северо-Муйском районе БРЗ в 2015 г. К этой же группе кластеров относится четвертый по числу объединенных эпицентров кластер из 545 эпицентров, ассоциированный с парными Чаруодинскими событиями 10.11.2005 г. и 11.12.2005 г. Только эпицентры Кичерских, Чаруодинских и Муяканских землетрясений на северо-востоке БРЗ остаются в пределах кластеров, для всех четырех наборов эпицентров  $(K_p \ge 8.6, 9.2, 9.8$  и 10.4) и четырех значениях уровня связанности β (см. рис. 4-рис. 7). Линейные размеры выделенных кластеров, которым принадлежат эпицентры этих событий, меняются от сотен километров при минимальном



100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120 100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120

**Рис. 4.** Пространственное распределение эпицентров землетрясений с  $K_p \ge 8.6, \ge 9.2, \ge 9.8$  и  $\ge 10.4$ , объединенных в кластеры алгоритмом DPS: (i) вошедшие в кластеры – цветные символы, (ii) не вошедшие в кластеры – символы серого цвета. Эпицентры землетрясений с  $K_p = 14$  и больше, вошедшие в кластеры, показаны черными звездочками; не вошедшие в кластеры – красными звездочками. Примечание: данные с 1989 по 2018 гг. Параметры алгоритма DPS: q = -2,  $\beta = -0.5$ .



**Рис. 5.** Параметры алгоритма DPS: q = -2,  $\beta = -0.25$ . Обозначения соответствуют подписи к рис. 4.



**Рис. 6.** Параметры алгоритма DPS: q = -2,  $\beta = 0$ . Обозначения соответствуют подписи к рис. 4.



100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120 100 102 104 106 108 110 112 114 116 118 120

Рис. 7. Параметры алгоритма DPS: q = -2,  $\beta = 0.25$ . Обозначения соответствуют подписи к рис. 4.

Параметры ал	поритма DPS		Характеристики кластеризации					
q	β	N	n <sub>eq</sub> , %	$R_q$ , км	α			
		$K_P \ge 8.6 \ (94')$	77 событий)					
	-0.5	17	73.9		7.4			
2	-0.25	15	54.2	Карактеристики кластеризации         n <sub>eq</sub> , %       R <sub>q</sub> , км         событий)       73.9         54.2       23.1         40.5       23.1         40.5       23.1         29.3       23.1         событий)       72         51       21.7         42.7       30.3         событий)       67.3         49.3       20.6         41.6       30.4         событий)       56.1         48.6       18.2         41.7       29.5	16.2			
-2	0	9	40.5	23.1	32.6			
	0.25	4	29.3	си кластеризации 23.1 21.7 20.6 18.2	69.5			
		$K_P \ge 9.2$ (48)	33 событий)					
	-0.5	14	72		4.4			
2	-0.25	13	51	21.7	9.1			
-2	0	11	42.7	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	18.4			
	0.25	4	30.3		40.3			
		$K_P \ge 9.8$ (240	62 событий)					
	-0.5	15	67.3		2.9			
2	-0.25	12	49.3	20 (	5.7			
-2	0	10	41.6	20.6	11.4			
	0.25	3	30.4	Пики кластеризации         R <sub>q</sub> , км         23.1         21.7         20.6         18.2	24.7			
		$K_P \ge 10.4$ (12)	90 событий)					
	-0.5	12	56.1		2.1			
_2	-0.25	12	48.6	ГИКИ КЛАСТЕРИЗАЦИИ R <sub>q</sub> , КМ 23.1 21.7 20.6 18.2	4.3			
-2	0	9	41.7	10.2	8.9			
	0.25	3	29.5		18.4			

Таблица 1.	Результаты	DPS-кластеризации	эпицентров о	сейсмических	событий,	зарегистриро	ванных с 19	89
по 2018 гг.								

 $\beta = -0.5$  до 2–3 десятков километров при максимальном  $\beta = 0.25$ .

Еще один кластер из 1589 эпицентров сформирован при  $\beta = -0.5$  для набора эпицентров землетрясений с  $K_p = 8.6$  и выше в центральной части БРЗ. В него вошли эпицентры Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 г. и Култукского землетрясения 27.08.2008 г. (на западе области кластера) и эпицентры Максимихинского землетрясения 20.05.2008 г. и Туркинского землетрясения 16.07.2011 г. (на востоке кластера). Как видно из рис. 4, при уменьшении числа рассматриваемых событий (увеличении минимального значения  $K_p$ ) этот кластер распадается на западную и восточную части. При увеличении плотности кластеризации с  $\beta = -0.25$  до  $\beta = 0$  (рис. 5 и рис. 6 соответственно) от группы остается только кластер, в который входит эпицентр Южно-Байкальского события 25.02.1999 г. При  $\beta = 0.25$  (рис. 7) алгоритм DPS не объединяет в кластер эпицентры землетрясений, расположенные на этой территории.

При анализе сейсмических событий, зарегистрированных с 1989 по 2018 гг., на северовостоке БРЗ выделено три устойчивых кластера эпицентров. Эти кластеры связаны с афтершоковыми сериями отдельных или парных сейсмических событий с  $K_p = 14$  и выше. На территории

#### НЕКРАСОВА и др.

	град.	л. град.	V		$K_P \ge$	2 8.6		$K_P \ge 9.2$			$K_P \ge 9.8$				$K_p \ge 10.4$				
Дата	с.ш.	В.Д.	K <sub>P</sub>	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
13.05.1989	50.17	105.34	15.0	9	8	7	0	9	9	6	0	10	9	6	0	11	11	0	0
16.03.2011	56.63	121.59	14.2	6	9	8	0	7	10	10	0	7	8	8	0	7	7	6	0
21.08.1994	56.70	118.03	15.5	5	7	9	0	6	8	9	0	9	7	7	0	9	9	8	0
26.04.1994	56.72	118.04	14.5	5	7	9	0	6	8	9	0	9	7	7	0	9	9	8	0
10.11.2005	57.37	120.77	15.7	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
11.12.2005	57.43	120.90	14.8	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
26.01.2009	57.40	120.78	14.2	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2
13.11.1995	56.13	114.55	15.1	3	2	2	0	2	2	7	0	2	11	9	0	10	10	0	0
23.05.2014	56.07	113.88	14.3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
25.02.1999	51.64	104.82	14.6	2	5	4	0	5	5	4	0	5	5	4	0	5	5	5	0
20.05.2008	53.30	108.49	14.3	2	4	5	4	3	4	5	4	4	4	5	0	6	6	7	0
27.08.2008	51.62	104.06	15.9	2	13	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16.07.2011	52.88	108.49	14.5	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26.10.1990	55.95	110.25	14.1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0
21.03.1999	55.83	110.34	14.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21.03.1999	55.85	110.26	14.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16.09.2003	56.05	111.34	14.3	1	11	0	0	1	11	0	0	11	12	0	0	0	0	0	0
04.07.2007	55.45	110.39	14.2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4	0
25.10.1989	57.45	118.84	14.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29.06.1995	51.71	102.70	14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02.09.2015	56.75	115.69	14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Таблица 2.** Принадлежность землетрясений с  $K_p \ge 14$  кластерам при q = -2 и  $1 - \beta = -0.5$ ;  $2 - \beta = -0.25$ ;  $3 - \beta = 0$ ;  $4 - \beta = 0.25$ 

Примечание: данные с 1989 по 2018 гг.

юго-западного фланга БРЗ и центральной части оз. Байкал устойчивых кластеров, которые бы сохранялись при изменении параметров алгоритма и набора анализируемых эпицентров, не выделено.

## Характеристики кластеризации 1964-2018 гг.

Дополнительно мы применили алгоритм DPS к наборам эпицентров сейсмических событий с энергетическим классом  $K_p \ge 8.6$  для шести непересекающихся временных интервалов с 1964 по 2018 гг. при фиксированных параметрах алгоритма DPS (q = -2,  $\beta = -0.5$ ). Временные интервалы выбирались так, чтобы в каждом из них, число зарегистрированных землетрясений было примерно одинаковым. А именно, алгоритм

DPS применен к наборам из 2423, 2426, 2382, 2384, 2405 и 2407 эпицентров землетрясений, зарегистрированных в периоды с января 1964 по май 1973 гг., с мая 1973 по декабрь 1982 гг., с июля 1986 по июнь 1997 гг., с июля 1997 по декабрь 2005 гг., с января 2006 по август 2012 гг. и с августа 2012 по декабрь 2018 гг. соответственно.

На рис. 8 представлены пространственные распределения эпицентров землетрясений с классом  $K_p \ge 8.6$  для шести рассмотренных непересекающихся временных интервалов. По аналогии с рис. 4-рис. 7 эпицентры, объединенные в кластеры, показаны на рисунке цветными символами. Каждый кластер имеет уникальный цвет.



**Рис. 8.** Пространственное распределение эпицентров землетрясений с энергетическим классом  $K_p = 8.6$  и выше: (i) вошедшие в кластеры – цветные символы, (ii) не вошедшие в кластеры – символы серого цвета. Землетрясения с энергетическим классом  $K_p \ge 14$ , вошедшие в кластеры, показаны черными звездочками, не вошедшие в кластеры – красными звездочками. Примечание: параметры алгоритма DPS: q = -2,  $\beta = -0.5$ .

Наблюдается существенное изменение структуры кластеров для указанных шести временных интервалов. Очевидна смена крупных структур с линейным размером порядка 1000 км, выделенных алгоритмом в первые три периода, на более мелкие — порядка 20—30 км структуры в последующие три периода. Эта динамика хорошо маркирована размерами цветных пятен на рис. 8.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2024

Параметры каталога	ì	Параметры алгоритма DPS						
14	A.T.	Клас	теры	~	<i>R</i> <sub>q</sub> , км			
интервал	IN <sub>eq</sub>	N	n <sub>eq</sub>	a				
янв. 1964—май 1973	2423	5	1859	5.0	46.7			
май 1973 – дек. 1982	2426	10	1779	3.3	30.8			
июль 1986-июнь 1997	2382	12	1766	3.2	35.6			
июль 1997-дек. 2005	2384	18	1470	2.3	15.2			
янв. 2006-авг. 2012	2405	19	1562	2.6	15.9			
авг. 2012-дек. 2018	2407	23	1356	2.1	9.3			

**Таблица 3.** Параметры кластеризации эпицентров сейсмических событий для шести непересекающихся временных интервалов ( $q = -2, \beta = -0.5$ )

Примечание: данные с 1964 по 2018 гг. для землетрясений с  $K_p = 8.6$  и выше.

В табл. 3 представлены характеристики кластеризации для шести непересекающихся временных интервалов с 1964 по 2018 гг. Число кластеров в один временной интервал растет: от пяти (январь 1964 г. – май 1973 г.) до двадцати трех (август 2012 г. – декабрь 2018 г.). При этом число эпицентров, объединенных в кластеры, уменьшается с 70% от общего числа зарегистрированных эпицентров до 56%. Значение локальной плотности  $\alpha$  уменьшается в 2.4 раза – с 5 до 2.1, а радиус кластеризации  $R_q$  уменьшается в 5 раз – с 46.7 до 9.3 км.

Отметим значительный скачок в значениях параметров кластеризации как в числе кластеров (удвоение!), так и в величинах радиуса кластеризации (дробление!) до и после середины 1997 г., в среднем с 9 до 20 кластеров и с более 30 км до менее 16 км соответственно. Нельзя исключить, что аналогичный скачок имел место в середине 1970-х гг. (с 5 до 10 кластеров и с ~45 до ~30 км).

В табл. 4 приведен список землетрясений с энергетическим классом  $K_P \ge 14$ , произошедших в пределах рассматриваемой области с 1964 по 2018 гг.

## Временной интервал январь 1964-май 1973 гг.

Период характеризуется максимальными значениями параметров кластеризации:  $\alpha = 5.0$ и  $R_q = 46.7$  км. Три из пяти выделенных кластеров, включают эпицентры сильных событий, произошедших в этот период. Первый кластер объединяет 1548 эпицентров, включая эпицентры шести землетрясений с магнитудами  $K_P \ge 14$ . А именно: землетрясение 30.08.1966 г., 31.08.1968 г., 26.11.1968 г., 28.03.1970 г., 15.05.1970 г. и 09.08.1972 г. Второй кластер, насчитывает 146 эпицентров, и, в основном, объединяет эпицентр Могодского землетрясения 05.01.1967 г., произошедшего в Центральной Монголии, и эпицентры его афтершоков. Третий кластер из 99 эпицентров охватывает эпицентры в районе Тас-Юряхского землетрясения 18.01.1967 г.

## Временные интервалы май 1973-декабрь 1982 гг. и июль 1986-июнь 1997 гг.

10 кластеров эпицентров (землетрясения, зарегистрированные с мая 1973 по декабрь 1982 гг.), и 12 кластеров эпицентров (землетрясения зарегистрированные с июля 1986 по июнь 1997 гг.), характеризуется значениями  $\alpha = 3.3, R_q = 30.8$  км и  $\alpha = 3.2, R_a = 35.6$  км соответственно. На рис. 8 видны пары наиболее крупных кластеров на территории Северного Прибайкалья и территории центральной и западной части оз. Байкал за эти интервалы. 986 эпицентров (май 1973-декабрь 1982 гг.) и 1040 эпицентров (июль 1986-июнь 1997 гг.) объединены в кластеры на территории Северного Прибайкалья, и 391 и 395 эпицентров, соответственно, объединены в кластеры на территории центральной и западной части оз. Байкал. Кластеры на территории центральной и западной части оз. Байкал, имеют одинаковую протяженность с юго-запада на северо-восток. Кластер, сформированный за более ранний временной интервал, включает эпицентры двух землетрясений – 22 и 27 мая 1981 г., расположенных на расстоянии около 318 км друг от друга. На территории кластера, объединившего 395 эпицентров, зарегистрированных с июля

Интервал	Дата	град, с.ш.	град, в.д.	K <sub>P</sub>	Порядковый номер кластера
	30.08.1966	51.76	104.61	14.0	1
	31.08.1968	56.40	115.80	14.0	1
	26.11.1968	56.00	111.40	14.0	1
10(4 1070	28.03.1970	52.23	106.01	14.0	1
янв. 1964—май 1973	15.05.1970	56.93	117.78	14.0	1
	09.08.1972	52.80	107.73	14.0	1
	05.01.1967	48.10	102.90	17.0	2
	18.01.1967	56.48	121.00	16.0	3
	21.06.1974	56.35	117.70	14.0	3
	17.01.1981	56.39	117.98	14.0	3
	18.12.1974	48.39	103.15	14.0	5
W 1072 1002	02.11.1976	56.19	111.59	14.0	1
май 1973 – дек. 1982	06.02.1979	48.95	116.68	14.0	0
	25.04.1981	49.00	121.97	14.0	0
	22.05.1981	51.96	105.52	14.0	2
	27.05.1981	53.94	108.92	14.0	2
	01.03.1987	49.78	102.47	14.4	0
	13.05.1989	50.17	105.34	15.0	3
	25.10.1989	57.45	118.84	14.3	21
1007 1007	26.10.1990	55.95	110.25	14.1	1
июль 1986—июнь 1997	26.04.1994	56.72	118.04	14.5	1
	21.08.1994	56.70	118.03	15.5	1
	13.11.1995	56.13	114.55	15.1	1
	29.06.1995	51.71	102.70	14.0	0
	25.02.1999	51.64	104.82	14.6	2
1007 2005	21.03.1999	55.83	110.34	14.5	1
июль 1997 – дек. 2005	21.03.1999	55.85	110.26	14.2	1
	16.09.2003	56.05	111.34	14.3	5
	04.07.2007	55.45	110.39	14.2	1
	20.05.2008	53.30	108.49	14.3	3
2007 2012	27.08.2008	51.62	104.06	15.9	9
янв. 2006—авг. 2012	26.01.2009	57.40	120.78	14.2	2
	16.03.2011	56.63	121.59	14.2	8
	16.07.2011	52.88	108.49	14.5	19
	23.05.2014	56.07	113.88	14.3	1
авг. 2012 – дек. 2018	02.09.2015	56.75	115.69	14.0	0

**Таблица 4.** Принадлежность землетрясений с  $K_p \ge 14$  кластерам при q = -2,  $\beta = -0.5$ 

Примечание: данные для шести временных интервалов с 1964 по 2018 гг. для землетрясений с  $K_P = 8.6$  и выше.

ФИЗИКА ЗЕМЛИ № 2 2024

1986 г. по июнь 1997 гг. землетрясений с  $K_p = 14$  и выше, не произошло.

Крупнейший кластер на северо-восточном фланге БРЗ. сформированный эпицентрами 1040 землетрясений, зарегистрированными с июня 1986 г. по июль 1997 гг., ограничен на востоке афтершоковыми областями Чарского землетрясения 21.08.1994 г. и Южно-Муйского землетрясения 13.11.1995 г. Эта же территория разбита (согласно анализу алгоритма DPS) на два кластера, сформированных эпицентрами землетрясений, произошедших с мая 1973 г. по декабрь 1982 гг., т.е. за предшествующий рассмотренный временной интервал, а именно: на востоке зоны в отдельный кластер вошли эпицентры двух умеренных землетрясений, произошедших 21.06.1974 г. и 17.01.1981 г., в то время как западнее в отдельный кластер выделены эпицентры, ассоциированные с Уоянским землетрясением 02.11.1976 г. (отметим, что 9 землетрясений с  $K_p = 13$  произошли в пределах кластера, ассоциированного с Уоянским землетрясением, с мая 1973 г. по декабрь 1982 гг.)

На северо-востоке БРЗ отметим отдельный кластер, сформированный 11 эпицентрами за интервал июль 1986 г.—июнь 1997 гг., в который вошел эпицентр землетрясения 25.10.1989 г. Это землетрясение с  $K_p \ge 14$  не вошло в кластеры, определенные на первом этапе исследования (рис. 4—рис. 7). Описываемый кластер сформирован при  $R_q = 35.6$  км, тогда как максимальный радиус кластеризации полученный для интервала с 1989 по 2018 гг. — 23.1 км.

Кластеры в области Могодского землетрясения (Центральная Монголия) выделены алгоритмом DPS для эпицентров, зарегистрированных с мая 1973 по декабрь 1982 гг. и с июля 1986 по июнь 1997 гг., а именно: кластер, объединяющий 46 эпицентров и включающий эпицентр землетрясения, произошедшего 18.12.1974 г., и кластер из 22 эпицентров, зарегистрированных с июля 1986 по июнь 1997 гг., не содержащий умеренных или более сильных сейсмических событий.

## Временные интервалы июль 1997-декабрь 2005 гг. и январь 2006-август 2012 гг.

18 кластеров эпицентров (землетрясения, зарегистрированные с июля 1997по декабрь 2005 гг.), и 19 кластеров эпицентров (землетрясения, зарегистрированные с января 2006 по август 2012 гг.), характеризуются значениями  $\alpha = 2.3$ ,  $R_q = 15.2$  км и  $\alpha = 2.7$ ,  $R_q = 15.9$  км соответственно. Повторим, отмеченное ранее, удвоение числа кластеров и дробление значения радиуса кластеризации по сравнению с двумя предыдущими временными интервалами. По сравнению с интервалом январь 1964—май 1973 гг. радиус кластеризации уменьшился в три раза, а число кластеров выросло более чем в 3 раза.

Крупнейший по числу событий в период июль 1997-декабрь 2005 гг. кластер объединяет 651 эпицентр. Он локализован на небольшой площади на северо-восточном фланге БРЗ и связан с эпицентрами Кичерских землетрясений 21.03.1999 г. В следующий временной интервал (январь 2006-август 2012 гг.) в этой области сформирован кластер, содержащий 528 эпицентров, в том числе эпицентр Томпудинского землетрясения 04.07.2007 г.

#### Временной интервал август 2012-декабрь 2018 гг.

Для последнего из рассмотренных временных интервалов август 2012—декабрь 2018 гг., получены минимальные значения радиуса кластеризации и локальной плотности эпицентров:  $R_q = 9.3$  км и  $\alpha = 2.1$ . Эти параметры характеризуют 23 кластера (максимальное число для 6 рассмотренных временных интервалов), объединивших 2407 эпицентров. 818 эпицентров (60% от всех эпицентров, вошедших в кластеры за этот интервал времени) объединены в один кластер, связанный с Муяканской последовательностью землетрясений, произошедшей в Северо-Муйском районе БРЗ в 2015 г. Все остальные кластеры в этот период объединяют не более 85 эпицентров каждый.

Кратко остановимся на эпицентрах событий с классом  $K_p = 14$  и выше, которые не вошли в кластеры, при анализе непересекающихся шести временных интервалов за период 1964— 2018 гг. Как и на рис. 4—рис. 7, на рис. 8 эти эпицентры представлены красными звездочками. Не вошли в кластеры:

– на юго-западном фланге БРЗ два землетрясения, зарегистрированные в интервале с июля 1986 г. по июнь 1997 гг. Это эпицентр землетрясения 01.03.1987 г., произошедшего на территории Монголии, и эпицентр землетрясения в районе Тункинских впадин 29.06.1995 г.;

– на северо-восточном фланге БРЗ эпицентр Таллайского землетрясения 02.09.2015 г., также оставшийся за пределами кластеров, описанных на первом этапе исследования, в интервале 1989–2018 гг.;

 на юго-востоке БРЗ два землетрясения, зарегистрированные в интервале с мая 1973 по декабрь 1982 гг. Это эпицентр землетрясения 06.02.1979 г., произошедшего в 90 км к юго-западу от Забайкальска, и эпицентр землетрясения 25.04.1981 г., произошедшего на Севере Китая. Отметим, что оба эпицентра расположены на периферии области регистрации БФ ЕГС РАН.

## **ДИСКУССИЯ**

Описана изменчивость формирования кластеров эпицентров сейсмических событий, зарегистрированных с 1989 по 2018 гг. при изменении порогового значения  $K_p$  и параметра  $\beta$ . DPS-анализ указывает на то, что на территории БРЗ устойчивые кластеры, в этот период формировались, в основном, на северо-восточном фланге региона. На юго-западном фланге БРЗ устойчивых кластеров, которые бы сохранялись при росте порогового значения К<sub>Р</sub> и увеличении уровня связанности β, не возникало. Возможно, это связано с относительно малым числом афтершоков, которые регистрируется у землетрясений юго-западного фланга БРЗ [Radziminovich, Ochkovskaya, 2013; Солоненко, Солоненко 1987; Голенецкий и др., 1997].

По результатам применения алгоритма DPS к эпицентрам землетрясений, зарегистрированным на территории БРЗ в течение шести непересекающихся временных интервалов, с 1964 по 2018 гг., выявлены изменения общего характера пространственного распределения эпицентров, а именно: кластеры в интервалах с января 1964 по май 1973 гг., с мая 1973 по декабрь 1982 гг. и с июля 1986 по июнь 1997 гг. имеют линейный размер порядка несколько сотен километров. 1548 эпицентров из 2423, зарегистрированных с января 1964 по май 1973 гг., формируют единый кластер на территории всего Байкальского рифта. Область этого кластера разбивается на 3 (для эпицентров землетрясений, зарегистрированных с мая 1993 по декабрь 1982 гг.) или на 2 (для эпицентров землетрясений, произошедших с июля 1986 по 1997 гг.).

Для трех временных интервалов (с июля 1997 по декабрь 2005 гг., с января 2006 по август 2012 гг. и с августа 2012 по декабрь 2018 гг.) линейные размеры кластеров имеют порядок десятков километров и составляют на территории БРЗ раздробленную мозаику, не образуя протяженных структур. Радиус кластеризации  $R_q = 15$  км, для интервалов май 1997—декабрь 2005 гг. и январь 2006—август 2012 гг., а для интервала август 2012 декабрь 2018 гг. уменьшается до 9 км, что составляет 1/5 значения  $R_q$ , определенного для интервала январь 1964—май 1973 гг. Причину драматического расхождения в результатах работы алгоритма DPS следует еще объяснить при дальнейших исследованиях. Однако уже сейчас можно предположить реализацию критического перехода режима сейсмической активности региона в конце 1990-х—начале 2000-х годов. в новое состояние. О возможности такого критического перехода говорит изменение вдвое среднего значения контрольного параметра Общего закона подобия для землетрясений η [Bukchin et al., 2020; Kossobokov, Nekrasova, 2017; 2019] в то же самое время на территории Прибайкалья — с 5.5 до 2.9 условных единиц.

### выводы

В настоящей работе представлены результаты применения алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа пространственной кластеризации сейсмических событий на территории Прибайкалья. Получены характеристики кластеризации в регионе для периода регистрации БФ ЕГС РАН 1989–2018 гг. при различных исходных параметрах алгоритма DPS и четырех уровнях минимального энергетического класса землетрясений рассматриваемого каталога сейсмических событий. Проведен анализ характеристик кластеризации сейсмических событий энергетического класса  $K_p \ge 8.6$  для шести непересекающихся периодов времени за период с 1964 по 2018 гг. при фиксированных параметрах алгоритма DPS.

Полученные результаты позволяют сделать несколько выводов, которые могут оказаться полезными при дальнейшем анализе сейсмичности региона и других сейсмоактивных территорий, а именно:

— наименьшее рассмотренное в исследовании значение связанности эпицентров кластеров ( $\beta = -0.5$ ) при фиксированном параметре q = -2 определяет максимальную площадь выделенных кластеров по сравнению с большими значениями связанности и, возможно, обеспечивает меньшую зависимость результатов работы алгоритма DPS от присутствия в выборке афтершоков;

 изменение пороговых значений уровня регистрации анализируемого каталога влияет на формирование кластеров не существенно. Общая структура пространственной кластеризации сохраняется при росте пороговых значений регистрации при постоянном значении связанности β. Это соответствует представлению о самоподобии распределения сейсмических событий в пространстве. Инвариантность методов дискретного математического анализа по отношению к масштабам изучаемых самоподобных явлений была отмечена в работе [Кособоков, Соловьев, 2018]. В частности, в нашем случае, можно сказать, что алгоритм DPS адаптируется под степень подобия исследуемой системы сейсмогенеза БРЗ.

По результатам применения алгоритма DPS к эпицентрам землетрясений, зарегистрированных на территории БРЗ в течение шести непересекающихся временных интервалов в период с 1964 по 2018 гг., выявлена изменчивость общего характера пространственного распределения эпицентров сейсмических событий региона. а именно: прослеживается переход выделения алгоритмом крупных структур с линейным размером порядка 1000 км к более мелким – порядка десятков километров. Значительное изменение пространственного масштаба выделенных кластеров может свидетельствовать о принципиальном изменении сейсмического режима на территории Прибайкалья в конце 1990-х – начале 2000-х годов.

Применение алгоритма DPS как инструмента для выделения изменений пространственного распределения эпицентров в отдельных сейсмически активных регионах представляется интересной и, безусловно, информативной исследовательской задачей. Также заслуживает внимания применение алгоритма DPS к данным предварительно декластеризованного каталога землетрясений. Пилотный анализ группируемости эпицентров основных толчков недавно был представлен в работе [Агаян, Некрасова, 2021] и будет продолжен в дальнейшем.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны автору алгоритма DPS C.M. Агаяну за обсуждение принципа работы алгоритма и автору программного кода алгоритма DPS Ш.Р. Богоутдинову за предоставление программного обеспечения для исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Агаян А.С., Некрасова А.К. Применение алгоритма топологической фильтрации DPS для анализа сейсмичности: Прибайкалье. Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: тезисы докладов II Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 29–30 сентября 2021 г. – М.: Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. 2021. С. 10–13. 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.

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.

Баскаков В.С., Голенецкий С.И., Серебренников С.П. Землетрясение 25(26) октября 1989 г. в районе северо-восточного окончания хребта Кодар (Становое нагорье). Землетрясения в СССР в 1989 г. М. 1993. С. 113–117.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука. 1988. 176 с.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзебоев Б.А. Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013. № 2. С. 44–57.

*Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О.* Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Докл. РАН. 2017а. Т. 474. № 1. С. 86–92.

*Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Вавилин Е.В.* Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье-Забайкалье // Докл РАН. 20176. Т. 477. № 6. С. 704–710.

*Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Дзебоев Б.А.* Проблема распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений: Актуальный обзор // Физика Земли. 2020. № 1. С. 5–29.

*Голенецкий С.И., Ружич В.В., Дреннова Г.Ф.* Землетрясение 12 (13) мая 1991 г. в районе пос. Бабушкин и сейсмичность Южного Байкала. Землетрясения в СССР в 1991 г. М.: ОИФЗ РАН. 1997. С. 47–52.

Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье // Докл. РАН. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335.

Государственный доклад "О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году". Иркутск: АНО "КЦ Эксперт". 2018. 340 с.

Дзебоев 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.

Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. № 4. С. 55–90.

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Я.Б., Филиппова А.И. Таллайское землетрясение 2 сентября 2015 г.,  $K_p = 14.0, M_w = 5.1, I_0 = 7-8$  на северо-восточном фланге Байкальского рифта // Землетрясения Северной Евразии. 2021. № 24(2015). С. 305–313. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.). М.: Наука. 1977. 536 с.

Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20.

Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука. 1987. 91 с.

*Agayan S.M., Tatarinov V.N., Gvishiani A.D., Bogoutdinov Sh.R., Belov I.O.* FDPS algorithm in stability assessment of the Earth's crust structural tectonic blocks // Russian Journal of Earth Sciences. 2020. V. 20(6). P. 1–14.

Agayan S.M., Dzeboev B.A, Bogoutdinov S.R., Belov I.O., Dzeranov B.V., Kamaev D.A. Development of the Algorithmic Basis of the FCAZ Method for Earthquake-Prone Area Recognition // Appl. Sci. 2023. V. 13. P. 2496.

Bukchin B.G., Fomochkina A.S., Kossobokov V.G., Nekrasova A.K. Characterizing the Foreshock, Main Shock, and Aftershock Sequences of the Recent Major Earthquakes in Southern Alaska, 2016–2018 // Front. Earth Sci. 2020. V. 8. P. 506.

*Gordon A.D.* Classification. London: Chapman and Hall. 1981.

*Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A.* Recognition of earthquake-prone areas / Keilis-Borok V., Soloviev A. (eds.). Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction. Springer: Heidelberg. 2003. P. 239–310.

Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B. Fuzzybased clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // Environmental Engineering and Management Journal. 2013. V. 12.  $\mathbb{N}$  1. P. 1–10.

*Kossobokov V.G., Nekrasova A.* Characterizing Aftershock Sequences of the Recent Strong Earthquakes in Central Italy // Pure Appl. Geophys. 2017. V. 174. P. 3713–3723.

*Kossobokov V.G., Nekrasova A.* Aftershock sequences of the recent major earthquakes in New Zealand // Pure and Applied Geophysics. 2019. V. 176. P. 1–23.

*Pisarenko V.F., Pisarenko D.V.* Modified k-nearest-neighbors method and its application to estimation of seismic intensity // Pure and Applied Geophysics. 2022. V. 179. P. 4025–4036.

*Radziminovich N.A., Ochkovskaya M.G.* Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone // Geodynamics & Tectonophysics. 2013. V. 4 (2). P. 169–186.

*Silverman B.W.* Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman and Hall. 1986.

## Analysis of Spatial Clustering of Seismic Events by the DPS Topological Filtering Algorithm: Lake Baikal Region

## A. K. Nekrasova<sup>*a,b,\**</sup>, A. S. Agayan<sup>*a,c,\*\**</sup>, and V. G. Kossobokov<sup>*a,\*\*\**</sup>

<sup>a</sup>Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia <sup>b</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

<sup>c</sup>Faculty of Geology, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: nastia@mitp.ru \*\*e-mail: nastaagaian@mail.ru \*\*\*e-mail: volodya@mitp.ru Received March 14, 2023 revised September 5, 2023 accepted September 10, 2023

Abstract – The paper presents the results of applying the Discrete Perfect Set (DPS) topological filtering algorithm to analyze the spatial clustering of seismic epicenters in the Lake Baikal region. The study utilizes earthquake data recorded by the seismic network of the Baikal Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences within the latitude range 48°N, 58°N and longitude range of 99°E, 122°E for the period from 1964 to 2018. Clustering characteristics are obtained for (i) the recording period from 1989 to 2018 with varying parameters of the DPS algorithm and four levels of the minimum energy class  $K_p$  of seismic events and (ii) six non-overlapping time intervals from 1964 to 2018 and seismic events of energy class  $K_p \ge 8.6$  with fixed parameters of the DPS algorithm.

The dynamics of the clustering parameters from 1964 to 2018 may characterise the variability of the seismic regime of the region. Specifically, the decrease in the linear size of the areas of identified epicenter groups from about a thousand km to tens km may indicate a significant change in the seismic regime of the Lake Baikal region at the end of the 1990s and the beginning of the 2000s compared to the period between 1964 and 1997.

Keywords: discrete mathematical analysis, topological filtering algorithm, clustering, Baikal Rift Zone